

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÁ
KATEDRA NETKANÝCH TEXTÍLIÍ

Obor: 3106 – T004

Zameranie: Netkané textílie

**VPLYV EKVIVALENTNÉHO PRIEMERU
NANOVLÁKIEN NA ZVUKOVÚ POHLTIVOSŤ A
NEPRIEZVUČNOSŤ NANOVLÁKENNÝCH
MEMBRÁN**

**INFLUENCE OF NANO-FIBRES EQUIVALENT
DIAMETER ON SOUND ABSORPTION AND
TRANSMISSION LOSS OF NANO-FIBRE
MEMBRANES**

Autor: Miroslava Tisoňová

Vedúci diplomovej práce: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.

Rozsah práce:

Počet strán: 86

Počet obrázkov: 15

Počet tabuliek: 15

Počet grafov: 8

Počet príloh: 5



V Liberci dňa: 12. 5. 2008

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že predložená diplomová práca je pôvodná a vypracovala som ju samostatne s použitím uvedenej literatúry. Prehlasujem, že citácia prameňov je úplná a že som v práci neporušila autorské práva (v zmysle zákona č. 121/2000Sb. O práve autorskom a o právach súvisiacich s právom autorským).

Súhlasím s umiestnením diplomovej práce v Univerzitnej knihovne TUL.

Bola som zoznámená s tým, že sa na moju diplomovú prácu plne vzťahuje zákon č. 121/2000 o autorskom práve, najmä § 60 (školské dielo) a § 35 (o nezárobkovom využití diela k vnútornej potrebe školy).

Beriem na vedomie, že TU v Liberci má právo na uzatvorenie licenčnej zmluvy o využití mojej diplomovej práce a prehlasujem, že **súhlasím** s prípadným využitím mojej práce (predaj, požičanie a pod.)

Som si vedomá toho, že použiť moju diplomovú prácu či poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom TU v Liberci, ktorá má právo odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, vynaložených univerzitou na vytvorenie diela (až do ich skutočnej výšky).

V Liberci, dňa 12. 5. 2008

.....

Tisoňová Miroslava

POĎAKOVANIE

Moje poďakovanie patrí predovšetkým vedúcej diplomovej práce Ing. Kláre Kalinovej, Ph.D., za vedenie, rady, pripomienky a trpezlivosť pri jej tvorbe a spracovaní. Taktiež ďakujem pánovi Filipovi Sanitníkovi a Ing. Janovi Novákovi, Ph.D. za ich pomoc pri realizácii experimentov. Za ochotu ďakujem všetkým pracovníkom katedry netkaných textílií TU v Liberci.

Zvláštne poďakovanie patrí hlavne mojej rodine, manželovi a priateľom za plnú podporu, ktorú mi po celú dobu štúdia dodávali.

ANOTÁCIA

Táto diplomová práca sa zaoberá štúdiom zvukovo pohltivých a nepriezvučných vlastností nanovláknenných vrstiev a vplyvom ekvivalentného priemeru nanovláknien na tieto vlastnosti.

Samotná otázka nanovláknenných materiálov, ich parametre a spôsoby výroby je vypracovaná v náležite označených kapitolách teoretickej časti. Dôležitou súčasťou teoretickej časti sú poznatky o zvuku a princípoch pohlcovania zvuku rôznymi materiálmi.

Náplňou experimentálnej časti je stanovenie činiteľa zvukovej pohltivosti a stupňa vzduchovej nepriezvučnosti v závislosti na meniacej sa frekvencii odťahu materiálu, ktorá ovplyvňuje vznik materiálu s rôznymi priermi nanovláknien. Pomocou získaných hodnôt je vyhodnotený vplyv daných parametrov na zisťovanú veličinu.

Kľúčové slová:

Ekvivalentný priemer, špecifický povrch, fólia, membrána, činiteľ zvukovej pohltivosti, stupeň vzduchovej nepriezvučnosti, zvuk, akustika, nanovlákná

ANNOTATION

The diploma thesis studies the sound absorption and transmission loss of nano-fibre membranes and the influence of the equivalent diameter of nano-fibres on this properties.

The issue of nanofibre materials concerning their parameters and production methods are worked out in appropriately marked chapters in the theoretical part of the diploma thesis. Important chapter of theoretical part is also the sound theory and the principles of sound absorption by various materials.

The determination of the sound absorption and the transmission loss on the dependence of changing frequency of material conduit, which influences producing material with difrent diameters of nano-fibres are described in experimental part. The

obtained datas help to evaluate the influence of existent parameters on the finding value.

Key words:

Equivalent diameter, surface area, foil, membrane, sound absorption coefficient, transmission loss, sound, acoustic, nanofibres

Zoznam symbolov a skratiek

c	$[m.s^{-1}]$	Rýchlosť zvuku
p_a	$[Pa]$	Akustický tlak
W	$[W]$	Akustický výkon
I	$[W.m^{-2}]$	Intenzita
dS		Vektor ležiaci v smere normály
S	$[m^2]$	Plocha
u	$[m.s^{-1}]$	Akustická rýchlosť
I	$[W.m^{-2}]$	Intenzita zvuku
L	$[dB]$	Hladina intenzity zvuku
I_0	$[W.m^{-2}]$	Prahová intenzita zvuku
λ	$[m]$	Vlnová dĺžka
v	$[m.s^{-1}]$	Rýchlosť postupného vlnenia
T	$[s]$	Periódá
f	$[Hz]$	Frekvencia
R_a	$[Pa.s.m^{-3}]$	Akustický odpor
f_r	$[Hz]$	Rezonančná frekvencia
m	$[kg]$	Hmotnosť membrány, dosky
S	$[m^2]$	Plocha membrány, dosky
d	$[m]$	Hrúbka vzduchovej vrstvy
ρ	$[kg.m^{-3}]$	Hustota vzduchu
v	$[N.m^{-1}]$	Radikálne pôsobiaca napínacia sila
F_r	$[N]$	Celková napínacia sila
r	$[m]$	Polomer membrány
c_M		Rýchlosť priečnej vlny
m_1	$[kg.m^{-2}]$	Plošná hmotnosť homogénnej elastickej membrány
E	$[Pa]$	modul pružnosti dosky
σ	$[-]$	Poissonova konštanta
d	$[m]$	Vzdialenosť dosky od steny
p, q	$[-]$	Čísla udávajúce mód kmitov
V	$[m^3]$	Objem
l	$[m]$	Hrúbka steny

α	[-]	Činiteľ zvukovej pohltivosti
τ	[-]	Činiteľ priezvučnosti
I_2	[W.m ⁻²]	Intenzita zvuku za stenou
I_1	[W.m ⁻²]	Intenzita zvuku pred stenou
R	[dB]	Stupeň vzduchovej nepriezvučnosti
W_4		Pohltená energia
W_1		Dopadajúca energia
W_3		Odrazená energia
PVA		Polyvinylalkohol
H ₃ PO ₄		Kyselina fosforečná
H ₂ O		Voda
nm		Nanometer = 10 ⁻⁹ m
r [nm]		Polomer nanovlákieň
ρ [g.cm ⁻³]		Hustota PVA roztoku

Obsah

1 ÚVOD	10
2 TEORETICKÁ ČASŤ	11
2.1 Teória netkaných textílií	11
2.2 Nanovlákná	11
2.3 Elektrostatické zvlákňovanie	12
2.3.1 História elektrostatického zvlákňovania	12
2.3.2 Podstata elektrospinningu	12
2.3.3 Parametre ovplyvňujúce elektrospinning.....	13
2.3.4 Aplikácie nanovláknien	14
2.4 Nanospider	14
2.5 Polyvinylalkohol	16
2.6 Teoretické poznatky o zvuku	16
2.6.1 Definícia zvuku	16
2.6.1.1 Definícia mechanického vlnenia.....	17
2.6.1.2 Akustika	18
2.6.1.3 Základné pojmy akustiky	18
2.6.1.4 Odraz zvuku	20
2.6.2 Mechanika pohlcovania	21
2.6.2.1 Porózne materiály	22
2.6.2.2 Obklady založené na rezonančnom princípe	23
2.6.2.2.1 Kmitajúce membrány.....	23
2.6.2.2.2 Kmitajúce dosky	24
2.6.2.2.3 Helmholtzove rezonátory.....	25
2.6.3 Činiteľ zvukovej pohltivosti	26
2.6.4 Stupeň vzduchovej nepriezvučnosti.....	26
2.6.5 Metódy merania činiteľa zvukovej pohltivosti a vzduchovej nepriezvučnosti.....	27
2.6.5.1 Dozvuková miestnosť	27
2.6.5.2 Metóda odrážanej vlny.....	28
2.6.5.3 Metóda dvojmikrofónovej impedančnej trubice.....	28
3 Experimentálna časť	29
3.1 Roztok použitý pri experimente.....	29

3.2	Príprava podkladového materiálu	30
3.3	Výroba nanovlákennej vrstvy	30
3.4	Metódy spracovania vzoriek a výsledkov	32
3.4.1	Stanovenie plošnej hmotnosti vzoriek	32
3.4.2	Spracovanie vzoriek pomocou elektrónového mikroskopu	33
3.4.2.1	Postup práce na elektrónovom mikroskope	34
3.4.3	Meranie ekvivalentného priemeru nanovláken	34
3.4.4	Stanovenie činiteľa zvukovej pohltivosti a vzduchovej nepriezvučnosti	35
3.4.4.1	Metóda dvojmikrofonovej prenosovej funkcie	36
3.4.4.2	Metóda štvormikrofónovej prenosovej funkcie	36
3.4.5	Anizotropia nanovlákenných vrstiev	38
3.4.6	Špecifický povrch nanovlákennej vrstvy	41
4	VÝSLEDKY A DISKUSIE	43
4.1	Zmena plošnej hmotnosti nanovlákenných vrstiev	43
4.2	Zmena ekvivalentného priemeru nanovláken	43
4.3	Vplyv plošnej hmotnosti na priebeh frekvenčnej závislosti činiteľa zvukovej pohltivosti a stupňa vzduchovej nepriezvučnosti	45
4.4	Vplyv ekvivalentného priemeru nanovláken na akustické charakteristiky	51
5	ZÁVER	55
6	Zoznam použitej literatúry	57
7	Zoznam príloh	59

1 ÚVOD

Rozvoj modernej civilizácie kráča ruka v ruke aj s dôsledkami, ktoré so sebou modernizácia prináša. Na cestách pribúda čoraz viac automobilov, v ovzduší lietadiel, stavajú sa nové fabriky a hluk, ktorý sa takto šíri prostredím čoraz viac ovplyvňuje naše životy. Hluk je považovaný za zvuk nežiadúci a preto sa odborníci stále viac a viac zaoberajú otázkou, ako nás pred ním čo najefektívnejšie chrániť.

Zvuk pohlcujúce materiály sú známe a vo veľkom využívané už mnoho rokov. Existuje rada výrobkov a materiálov tlmiacich alebo pohlcujúcich zvuk, avšak neustále prevláda snaha na ich zdokonaľovanie.

Zvuk absorbujúce materiály využívané v miestnostiach a uzatvorených priestoroch sú určené k redukcii odrážaných zvukov, hlukov, alebo ku kontrole ozvien a tým k zlepšeniu počuteľnosti v miestnostiach. Bežné absorbujúce materiály – akustické stropné dlaždice, obklady, ale aj drevo a betón – sú určené k použitiu v kinách, divadlách, nahrávacích a vysielačích štúdiách, továrňach atď. a prinášajú do týchto priestorov akustické a protihlukové riešenia [33].

V súčasnosti zaznamenáva väčšina odvetví technický pokrok, vynaliezajú sa nové stroje a technológie a tento pokrok sa samozrejme nevyhýba ani výrobe netkaných textílií. S možnosťou výroby nanovláken v priemyslovom merítku sa tieto úspešne využívajú aj ako zvuk absorbujúce materiály. Výborne pohlcujú zvuk a navyše sa jedná o materiál skoro neviditeľný. Sú preto ideálnym materiálom pre odhlučenie interiérov automobilov a lietadiel. Nanovlákené vrstvy nanosené na porózny vlákenný materiál plnia funkciu membrány a využívajú sa ako súčasť zvukových absorbérov [5].

Aj táto práca sa zaoberá využitím nanovlákennej membrány ako zvuk absorbujúceho materiálu. Jej cieľom bola príprava nanovlákených vrstiev o rôznych plošných hmotnostiach s rôznymi priermi nanovláken a to zmenou parametrov počas procesu zvlákňovania. Týmito parametrami sú - rýchlosť odťahu vznikajúceho materiálu (2x2, 2, 5, 7 a 10 Hz) a taktiež výška zvlákňovania (50, 70, 90, 110 a 130 mm). Po vytvorení nanovlákených vrstiev sa na nich prevádzali akustické skúšky. Sledoval sa činiteľ zvukovej pohltivosti a stupeň vzduchovej nepriezvučnosti, ktoré boli v závere vyhodnotené vzhľadom na meniacu sa plošnú hmotnosť vzoriek a priemer nanovláken.

2 TEORETICKÁ ČASŤ

2.1 Teória netkaných textílií

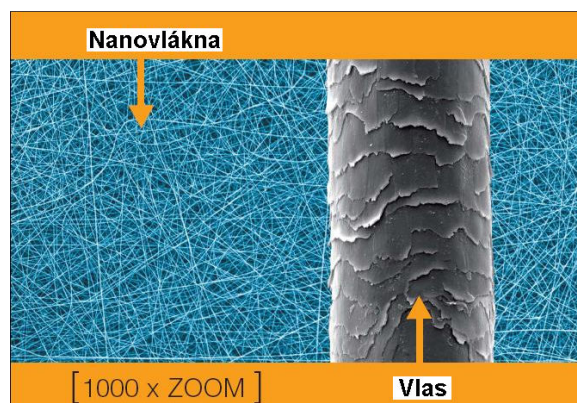
Netkaná textília je definovaná ako vrstva, ktorá je vyrobená z jednosmerne alebo náhodne orientovaných vlákien. Tieto vlákna sú navzájom spojené trením, alebo kohéziou, poprípade adhéziou. Medzi netkané textílie nepatrí papier ani výrobky vyrobené tkaním, pletením, všívaním prípadne plstením [1].

Netkané textílie vyrobené základnými technológiami (naplavovaním, mechanicky, aerodynamicky alebo priamo z polyméru) je možné ďalej upravovať napr. zušľachtovaním, potlačou alebo farbením. Vrstvené textílie vznikajú vrstvením aspoň jednej vlákenej vrstvy s iným plošným textilným či netextilným útvarom. Oblasť použitia netkaných textílií je veľmi široká. Ide napríklad o použitie ako geotextílie, bytové textílie, filtre, vložkové materiály, zdravotnícke textílie, automobilový priemysel, agrotexťlie [1].

Nakoľko technický pokrok v každom odvetví postupuje neustále dopredu a dochádza k vzniku a vývoju nových strojov a technológií, tak ani netkané textílie nie sú výnimkou a preto sa v súčasnej dobe upriamuje veľká pozornosť na nanovláknenné textílie a ich využívanie v bežnom živote.

2.2 Nanovláknna

V súčasnosti veľmi využívané nanovláknna sú vlákna, ktorých priemery dosahujú submikroskopický rozsah (10^{-9} m) [2]. Pre predstavu tejto veľkosti sú na obrázku 1 porovnané nanovláknna a ľudský vlas.



Obr. 1: Porovnanie veľkosti vlasu a nanovláknien [3]

Nanovlákná vznikajú počas elektrostatického zvlákňovania a vďaka svojím vynikajúcim vlastnostiam (veľká pórovitosť, malé póry, vysoký merný povrch, nízka hodnota priemeru vlákien) majú vynikajúce uplatnenie najmä v medicíne a technickom priemysle ako filtre, separačné membrány, výstuhy kompozitných materiálov a iné [4].

2.3 Elektrostatické zvlákňovanie

2.3.1 HISTÓRIA ELEKTROSTATICKEHO ZVLÁKŇOVANIA

Postup elektrostatického zvlákňovania bol patentovaný Formhalsom, ktorý v období medzi rokmi 1934 – 1944 publikoval sériu patentov [6, 7, 8, 9, 10]. Navrhol experimentálny postup pre výrobu vlákien z polyméru (konkrétne acetátu celulózy) využitím elektrostatických síl – elektrospinning. Zariadenie pre elektrospinning v jeho najjednoduchšej forme pozostávalo z pipety, v ktorej bol polymérny roztok, dvoch elektród opačnej polarít, uzemneného kolektoru a zo zdroja vysokého napätia v rozsahu kV [2].

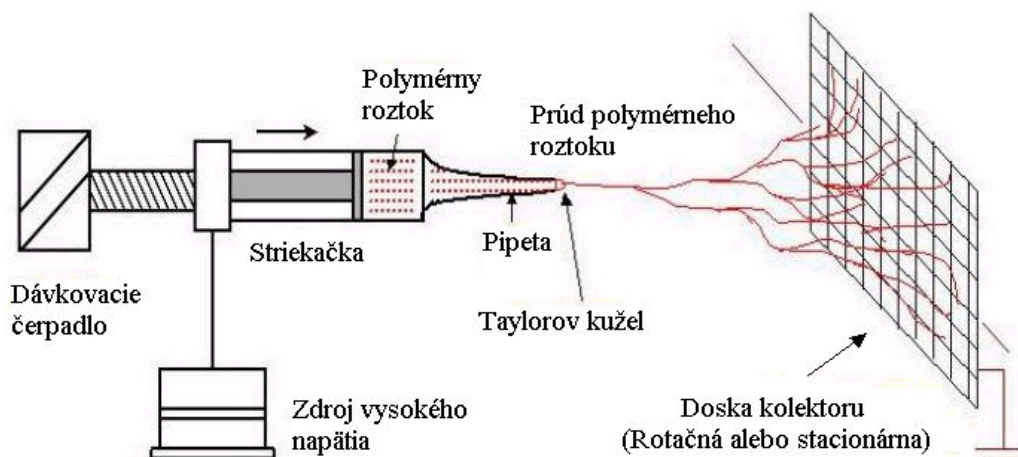
Formhalsa nasledovala celá rada vedcov, ako Baumgart (1971), Fong a Reneker (1999), Lim a kolektív (2004). V roku 1952 sa Vonnegutovi a Neubauerovi podarilo zostaviť prístroj pre elektrostatické rozprašovanie, tzv. elektrospaying, pomocou ktorého produkovali prúdy zelektrozovaných kvapiek o priemeroch asi 0,1 mm [11].

2.3.2 PODSTATA ELEKTROSPINNINGU

V procese elektrospinningu na tekutinu polyméru pôsobí vysoké napätie, takže náboje sú indukované vnútri tekutiny. Využíva sa rovnomerné elektrostatické pole

o vysokej intenzite. Toto pole tvorí napätie medzi elektródami, z ktorých jedna je v podobe úzkej kapiláry a druhá v podobe kruhového disku – kolektoru. Kapilárou je vytlačovaný polymérny roztok a vďaka tomu, že je nabitá, dochádza k prenosu náboja do celého roztoku [2]. Kapilára môže rotovať a tým na konci trysky pôsobí odstredivá sila. Na polymérny roztok v ústí kapiláry pôsobia coulombovské sily.

K zvlákňovaniu dochádza, keď elektrostatické sily na povrchu polymérneho roztoku (taveniny) prekonajú povrchové napätie a sily elektricky nabitej elektródy. Nabitý povrch tekutiny je labilný. Keď náboj vnútri tekutiny dosiahne kritickú hodnotu, dochádza k tvorbe Taylorovho kužeľa – mikroskopického útvaru, ktorý je výsledkom coulombovských, viskozitných a odstredivých síl. Z Taylorovho kužeľa je následne vypudzovaná tryska, vznikajúce vlákno sa pohybuje smerom k miestam s nižším potenciálom, ktorý väčšinou predstavuje uzemnený kolektor, je dlžené a štiepené a počas jeho prichytávania na kolektor dochádza k odparovaniu rozpúšťadla. Vytvorené vlákno je polárne nabité, avšak náboj sa vytratí pri dopade na kolektor, ktorý je uzemnený [12].



Obr. 2. Schematické znázornenie elektrostatického zvlákňovania s horizontálnym usporiadaním [4]

2.3.3 PARAMETRE OVPLYVŇUJÚCE ELEKTROSPINNING

Existuje mnoho parametrov, ktoré ovplyvňujú morfológiu a vlastnosti vznikajúcich nanovláken (napr.: priemer nanovláken, koncentráciu vznikajúcich nanovláken, výskyt a koncentráciu koráľkového efektu na nanovláknach), hodnotu kritického napätia pri zvlákňovaní, intenzitu zvlákňovania a iné [5]. Delia sa na:

- **Parametre polymérneho roztoku** – molekulová hmotnosť a viskozita roztoku, povrchové napätie, vodivosť roztoku, dielektrický účinok rozpúšťadla
- **Spracovateľské podmienky** - vysoké napätie, teplota okolia, účinok kolektoru, priemer pipety, vzdialenosť medzi špičkou a kolektorom
- **Okolité podmienky**- vlhkosť, druh atmosféry, tlak [2]

2.3.4 APLIKÁCIE NANOVLÁKIEN

V súčasnosti existuje celá rada odvetví, v ktorých nachádzajú nanovlákná a nanovláknenné vrstvy vďaka svojim vynikajúcim schopnostiam uplatnenie. U niektorých oborov je možné počítať s ich využívaním v blízkej budúcnosti.

- ✓ **Kompozity** – je možné vyrábať vlákna s pridanými malými nerozpustnými čiastočkami – živé bunky, zlaté čiastočky, karbónové nanovlákná.
- ✓ **Filtračné aplikácie** – nanovláknenné materiály sú schopné odfiltrovať nebezpečné baktérie a víry, cigaretový dym a iné [5].
- ✓ **Biomedicína** – patrí tu tkaninové inžinierstvo, podložky pre rast tkanív, umelé orgány, krvné cievy, obväzové materiály, ochranné rúšky.
- ✓ **Ochranné odevy** – vďaka svojej vysokej pórovitosti ale veľmi malej veľkosti pórov poskytujú nanovlákná dobrý odpor k prieniku činiteľov chemického poškodenia.
- ✓ **Zvukové izolácie** – textílie z nanovlákién výborne pohlcujú zvuk. Sú preto ideálnym materiálom pre odhlučenie interiérov automobilov a lietadiel. Navyše ide o materiál neviditeľný, pretože hrúbka vlákna je menšia než vlnová dĺžka svetla, ktorú človek vníma [2,5].

2.4 Nanospider

Nanovlákná donedávna vyrábané len v laboratórnych podmienkach je v súčasnosti možné produkovať aj v priemyselnom merítke a to použitím prístroja “Nanospider“ , ktorý umožňuje:

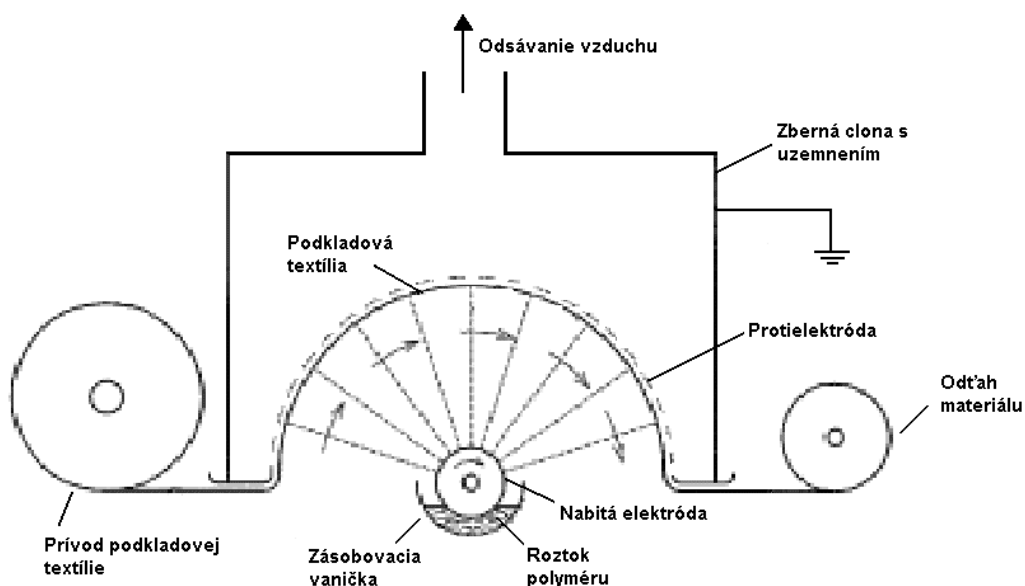
- Výrobu nanovláknenných textílií v priemysle
- Vysokú výrobnú kapacitu
- Jednoduchú údržbu a energeticky efektívnu výrobu

- Vysokú kvalitu nanovlákennej vrstvy
- Umožňuje modifikáciu technológie i vlastností vyrábaných materiálov

V princípe sa jedná o upravenú metódu prípravy nanovláken a nanovláknenných vrstiev z roztokov polymérov (viď 3). Avšak na rozdiel od klasickej metódy, technológia nanospider využíva pre tvorbu vlákien rotujúci valec, ktorý je čiastočne ponorený do polymérneho roztoku [12].

Počas otáčania valca dochádza k nánosu vrstvy polyméru na jeho vrchnú časť a na povrchu tekutiny sa vplyvom nestabilit a silného elektrostatického poľa tvoria blízko seba po celej dĺžke valca Taylorové kužele. Prúdy roztokov polyméru sa počas následného odparovania rozpúšťadla, pred tým než dopadnú na zbernú elektródu, menia na pevnú fázu.

Tryska je nahradená zásobovacou vaničkou s roztokom polyméru, v nej je umiestnený kovový valček – elektróda, ktorá je rovnomerne napájaná elektrickým prúdom. Naproti elektróde je umiestnená protielektróda, pod ktorou je podkladová textília slúžiaca k zachytávaniu vznikajúcich nanovláken. Ďalej je potrebné odsávanie vzduchu, ktoré je umiestnené v smere tvorby vlákien [13].



Obr. 3.: Schéma zariadenia Nanospider [14]

2.5 Polyvinylalkohol

V experimentálnej časti tejto práce bol pri tvorbe nanovlákennej vrstvy použitý polyvinylalkohol.

Polyvinylalkohol sa pripravuje hydrolýzou polyvinylacetátu v kyslom alebo alkalickom prostredí. Priama syntéza z monoméru nie je možná, nakoľko vinylalkohol nie je stály ale prechádza na stabilnejšiu formu – acetaldehyd.

Podľa stupňa hydrolýzy je možné získať produkty, ktoré obsahujú len alkoholické skupiny, alebo také, kde je zachovaná určitá časť acetátových skupín. Lineárne makromolekuly s polárnymi hydroxylovými skupinami sú navzájom pútané silnými medzimolekulárnymi väzbami – vodíkovými mostíkmi. Časť hmoty je v kryštalickom stave. Tento podiel sa zvyšuje so stúpajúcim stupňom hydrolýzy.

V amorfnom stave je polyvinylalkohol rozpustný vo vode, v kyselinách a vo fenole. V organických rozpúšťadlách je nerozpustný. Rozpustnosť vo vode klesá s rastúcim počtom nezhydrolyzovaných acetátových skupín.

Rozpustnosť vo vode je možné znížiť rôznymi spôsobmi zosieťovania, napr. formaldehydom alebo účinkom kyselín.

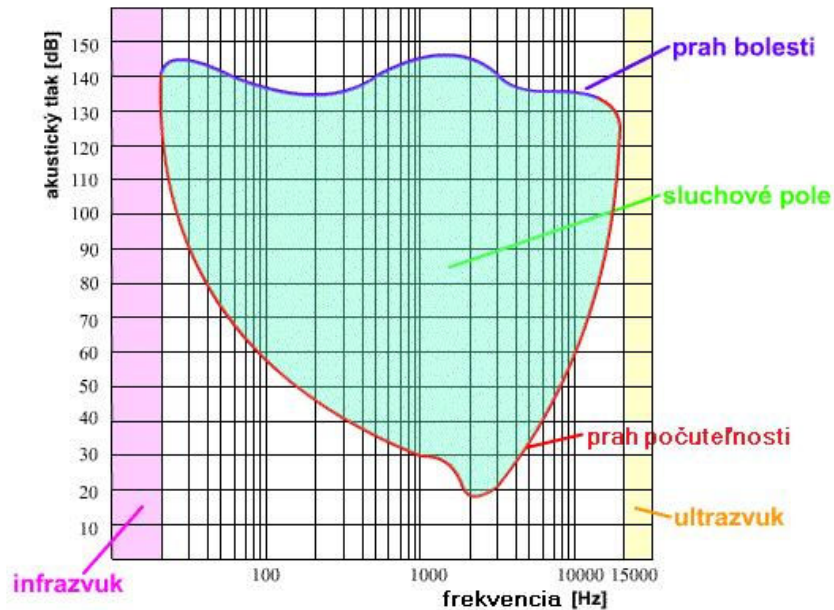
Tepelné vlastnosti polyméru - Bezvodný PVA netaje a do 140°C sa nemení. Pri vyššej teplote mäkne (teplota spracovania je 120 až 150°C) a nad 200°C sa rozkladá a uhoľnatie [15].

2.6 Teoretické poznatky o zvuku

2.6.1 DEFINÍCIA ZVUKU

Presná definícia zvuku znie: „Zvukom je každé mechanické vlnenie v látkovom prostredí, ktoré je schopné v ľudskom uchu vyvolať sluchový vnem“. Frekvencia tohto vlnenia leží v rozsahu približne 20 Hz až 20 kHz. V určitom zmysle je možné za zvuk považovať i vlnenie s frekvenciami mimo tento rozsah.

Zvuk je teda časť spektra mechanického vlnenia vzduchu, ktoré je schopný vnímať človek, v širšom pojmání je ho schopný vnímať živočích. Zvuk s frekvenciou nižšou než 20 Hz (ktorý počuje napr. slon) sa nazýva infrazvuk a zvuk s frekvenciou vyššou ako 20 kHz (napr. delfín) sa označuje ako ultrazvuk [16].



Obr. 4.: Oblasť počuteľnosti zvuku v závislosti na frekvencii a sile [17]

Vnímanie zvuku je veľmi subjektívne. Oblasť počuteľnosti je vymedzená pásom počuteľných kmitočtov približne od 16 do 16 000 Hz a rozsahom intenzity zvuku medzi prahom počutia (asi $10\text{--}12 \text{ W/m}^2$) a prahom bolesti (asi 102 W/m^2) [18].

2.6.1.1 Definícia mechanického vlnenia

Mechanické vlnenie sa šíri prostredím a nedochádza pri ňom k prenosu hmoty, ale iba k prenosu energie. K vzniku mechanického vlnenia dochádza vo všetkých skupenských stavoch látok a jeho príčinou je existencia väzbových síl medzi časticami (atómami, molekulami) prostredia, v ktorom sa vlnenie šíri. Kmitanie jednej častice sa vzájomnou väzbou prenáša na častice ďalšie. Súčasne sa na túto časticu prenáša energia kmitavého pohybu. Takéto prostredie sa označuje ako prostredie pružné.

Existujú dva typy vlnenia:

- **Postupné vlnenie priečne** – hmotné body pružného prostredia kmitajú kolmo na smer, v ktorom vlnenie postupuje
- **Postupné vlnenie pozdĺžne** – častice prostredia kmitajú v smere, ktorým vlnenie postupuje. Vzniká v telesách všetkých skupenstiev, teda aj v kvapalinách a plynch, ktoré sú pri zmene objemu pružné. Dôležité je, že zvuk sa šíri práve týmto vlnením [16].

Zvuk je charakterizovaný tromi základnými veličinami:

- **Výškou zvuku** - ktorú určuje frekvencia kmitania zdroja zvuku. Čím je táto frekvencia vyššia, tým je vyšší tón.
- **Farbou zvuku** – farba zvuku umožňuje sluchom rozoznať hudobné nástroje, ktoré vydávajú tóny o rovnakej výške.
- **Hlasitosťou zvuku** – ktorá charakterizuje ako silno pôsobí zvuk na sluch. Hlasitosť závisí na intenzite zvuku a na citlivosti sluchu na zvuky rôznej frekvencie [16, 19].

2.6.1.2 Akustika

Akustika je odbor, ktorý sa zaoberá fyzikálnymi dejmi a biologickými procesmi, ktoré sú spojené so vznikom zvukového vlnenia, jeho šírením a vnímaním zvuku sluchom. Delí sa na:

- **Fyzikálna akustika** – študuje spôsob vzniku a šírenia zvuku. Taktiež sa zaoberá jeho odrazom a pohlcovaním v rôznych materiáloch.
- **Hudobná akustika** – skúma zvuky a ich kombinácie so zreteľom na potreby hudby a spevu.
- **Fyziologická akustika** – zaoberá sa vznikom zvuku v hlasovom orgáne človeka a jeho vnímaním v uchu. Lekárska hygiena sa tiež podrobne zaoberá vplyvom hluku na ľudské zdravie a fungovanie ľudského organizmu [19].
- **Stavebná akustika** – skúma dobré a nerušené podmienky počúvateľnosti hudby a reči v obytných miestnostiach a v sálach.
- **Elektroakustika** – zaoberá sa záznamom, reprodukciou a šírením zvuku s využitím elektrického prúdu [20, 21].
-

2.6.1.3 Základné pojmy akustiky

Rýchlosť zvuku c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] - predstavuje rýchlosť, akou sa zvukové vlny šíria prostredím a teda za ako dlho prekoná zvuková vlna v danom materiáli vzdialenosť 1m. Rýchlosť zvuku vo vzduchu je závislá na atmosférických podmienkach. Najväčší vplyv na jej hodnotu má teplota vzduchu, ale aj tlak a vlhkosť vzduchu. V kvapalinách a v pevných látkach je rýchlosť zvuku väčšia než vo vzduchu [16].

LÁTKA	RÝCHLOSŤ ZVUKU [m.s ⁻¹]
Vzduch(13,4 °C)	340
Voda (25 °C)	1500
Ortuť	1400
Betón	1700
Ľad	3200
Oceľ	5000
Sklo	5200

Tab. 1.: Približné hodnoty rýchlosti zvuku pre niektoré latky [22]

Akustický tlak p_a [Pa] – je prejav akustickej energie v mieste pôsobenia, tam kde je akustický tlak odlišný od tlaku barometrického. Hodnoty akustického tlaku sa pohybujú v rozmedzí $2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^2$ Pa.

Akustický výkon W [W] – predstavuje výkon, ktorý vyžaruje zdroj zvuku. Je merítkom celkovej zvukovej energie prechádzajúcej plochou. Závisí na veľkosti plochy a na intenzite. Je daný integrálom skalárneho súčinu:

$$W = \int_S \vec{I} \cdot d\vec{S}$$

kde $d\vec{S}$ je vektorom ležiacim v smere normály na plochu a S [m²] je plocha, na ktorú je akustický výkon stanovovaný.

Akustická rýchlosť u [m.s⁻¹] – je rýchlosť, akou kmitajú častice v prostredí, v ktorom sa šíri zvuková vlna. Kmitanie častíc je pravidelné a usporiadané [23].

Intenzita zvuku I [W.m⁻²] – intenzita zvuku je definovaná ako pomer výkonu zvukového vlnenia a plochy, ktorou vlnenie prechádza [24]:

$$I = \frac{W}{S}$$

Hladina intenzity zvuku L [dB] – je daná vzťahom:

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

kde I_0 je predstavuje prahovú hodnotu zvuku [16].

Vlnová dĺžka – je vzdialenosť dvoch najbližších bodov, ktoré kmitajú fázou. Tiež je definovaná ako vzdialenosť, ktorú vlnenie urazí za 1 periódu.

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$$

kde λ je vlnová dĺžka, v [m.s⁻¹] je rýchlosť postupného vlnenia, T [s] perióda a f [Hz] frekvencia kmitania [19].

Perióda T [s] – predstavuje najkratšiu dobu, za ktorú sa dej opakuje.

Frekvencia zvuku f [Hz] – vyjadruje sa počtom zmien, za jednotku času [16]

$$f = \frac{1}{T}$$

ZVUK	FREKVENCIA [Hz]
Dunenie v zemi, zemetrasenie	10
Najnižšia počuteľná frekvencia	20
Najnižší tón na klavíri	27
Nízky hlas muža	80
Stredný tón na klavíri	263
Spektrum ženskej reči	400
Základný tón	1000
Najvyšší tón na klavíri	4186
Sykavky	10000
Najvyššia počuteľná frekvencia	20000

Tab .2.: Príklady frekvencií bežných zvukov [22]

2.6.1.4 Odraz zvuku

Ak zvukové vlnenie dopadá na rovnú stenu, ktorej rozmery sú v porovnaní s vlnovou dĺžkou vlnenia omnoho väčšie, potom časť energie vlnivého pohybu vniká do materiálu steny, v ktorom sa absorbuje a druhá časť sa od steny odráža. Pri tom platí, že uhol odrazu od steny je rovný uhlu dopadu. Ak vlnenie dopadá kolmo, vracia sa späť. Pokiaľ je zdroj zvuku aspoň 17 m od steny, potom je sluch schopný rozoznávať odrážaný zvuk od pôvodného a tým vzniká ozvena. Sluchom môžeme rozoznať dva po sebe idúce zvukové signály iba vtedy, ak je medzi nimi časový odstup minimálne 0,1 s [25].

2.6.2 MECHANIKA POHLCOVANIA

Nežiadúce hluky prenikajúce do miestností z okolia je potrebné tmiť. K schopnosti tlmenia sa vzťahuje vzduchová nepriezvučnosť. Akustické obklady pre pohlcovanie zvuku majú veľmi nízky stupeň vzduchovej nepriezvučnosti. Dobré akustické podmienky uzatvorených priestorov vyžadujú určitú úpravu tak, aby bola doba dozvuku optimálna. Kvôli tomu sa prevádzajú úpravy pohltivosti stien, aby dochádzalo k maximálnemu využitiu pohltivých vlastností niektorých látok a konštrukcií. Pod pojmom pohlcovanie zvuku rozumieme tiež obmedzovanie hluku vnútri miestností alebo pracovných priestorov. Z hľadiska pohlcovania zvuku sa obklady delia do troch skupín:

- Obklady tvorené poróznymi materiálmi
- Obklady založené na princípe rezonancie
- Zložené pohltivé konštrukcie [26]

Pod pojmom pohlcovania zvuku rozumieme nevratnú zmenu zvukovej energie v energiu inú. Z tohto hľadiska sa spôsob premeny zvukovej energie pri šírení v pevných látkach delí na tri druhy:

- **Premeny vznikajúce trením** – ak sa vzduchové častice pohybujú pozdĺž určitej plochy, dôjde trením k premene zvukovej energie v energiu tepelnú. K viskóznym stratám zvukovej energie dochádza na stenách otvorov, pórov, na povrchu kanálikov alebo vlákien. Ak je akustický obklad tvorený doskou alebo stenou, ktoré sú schopné mechanických kmitov, dôjde vplyvom dopadajúcich zvukových vln k ich rozkmitaniu. Časť mechanickej energie dosky sa mení na energiu akustickú, zvyšok sa vplyvom vnútorného trenia zmení v energiu tepelnú [26].
- **Premeny vznikajúce poklesom akustického tlaku – relaxačnými zmenami** – vznikajú následkom zmenšenia akustického tlaku. Ak sa vlnenie šíri v miestach, kde nastáva zhustenie častíc, celkový tlak stúpa a akustický tlak nadobúda kladné hodnoty. Zmenšením – relaxáciou akustického tlaku sa zmenší nahromadená potenciálna energia a tým sa zmenší aj energia zvukovej vlny. Pri šírení zvuku pevnou látkou alebo pevnou kostrou poróznej látky, dôjde pri

zmene prierezu kostry k zvýšeniu teploty. Ak je daná látka dobrým vodičom tepla, dôjde k vyrovnaniu teplôt s okolím a tým k relaxácií.

- **Premeny vznikajúce nepružnou deformáciou telies** – dochádza k nim u látok, ktoré vykazujú pružnú hysteréziu. Pri stlačení takejto látky určitou silou sa daná látka po skončení pôsobenia nevráti do pôvodného stavu. Práca vynaložená na deformáciu je teda väčšia ako práca získaná pružnosťou telesa späť pri návrate do pôvodného tvaru. Jej rozdiel predstavuje úbytok zvukovej energie vplyvom nedokonalnej pružnosti [26].

2.6.2.1 Porózne materiály

Porózne materiály – vlákňité, kanálikovité, alebo penené - ktoré sa využívajú v akustike predstavujú pevné látky, ktoré majú malé dutinky vo svojom objeme vyplnené vzduchom. Pomer objemu týchto dutiniek k celkovému objemu látky činí asi 80 – 99 % celkového objemu. Ak má materiál dobre pohlcovať zvuk, musia byť jeho póry navzájom prepojené, aby sa mohol zvuk materiálom ďalej šíriť. U materiálov, ktoré majú poddajnú alebo elastickú kosť nemusia byť póry prepojené, pretože zvuk do nich môže veľmi ľahko prechádzať. Vlastné pohlcovanie zvuku, teda premena akustickej energie na tepelnú sa deje v medznej vzduchovej vrstve u povrchu vlákien alebo kostry vplyvom viskózných síl.

So zvyšovaním hrúbky materiálu sa zvyšuje aj hodnota činiteľa zvukovej pohltivosti v oblasti nízkych kmitočtov. Súvisí to s veľkosťou pohybovej energie menenej na teplo, ktorá závisí na amplitúde akustickej rýchlosti. Táto rýchlosť je u zadnej steny, kde vzniká pri odraze zvuku jej uzol, rovná nule.

Ak sa zväčší hrúbka porózneho materiálu je možné smerom k nižším kmitočtom dosiahnuť prvé maximum činiteľa zvukovej pohltivosti. Zároveň sa tým zvýši aj akustická poddajnosť obkladu. Podobný účinok je možné dosiahnuť, ak sa za poróznou vrstvou vytvorí uzatvorený vzduchový vankúš [26].

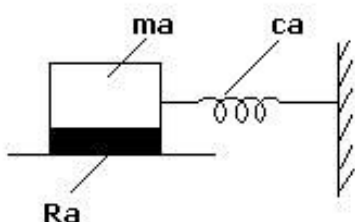
2.6.2.2 Obklady založené na rezonančnom princípe

Tieto obklady sa delia na:

- Kmitajúce membrány
- Kmitajúce dosky
- Helmholtzove rezonátory

Za predpokladu, že sa rezonančná sústava skladá z akustickej hmotnosti m_a , pripojenej na akustickú poddajnosť c_a je jej pohyb tlmený akustickým odporom R_a . Ak na túto sústavu dopadne zvukové vlnenie, uvedie ju do vynútených kmitov, ktorých amplitúda bude v prípade rezonancie maximálna. Ak na sústavu prestane vlnenie dopadať, bude ešte po určitú dobu dokmitávať vlastným, rezonančným kmitočtom. Tento jav sa nazýva doznievanie, môže k nemu dôjsť u rezonančných sústav ale i zdrojov zvuku. Doba, počas ktorej rezonátor doznieva závisí na tlmení rezonátoru.

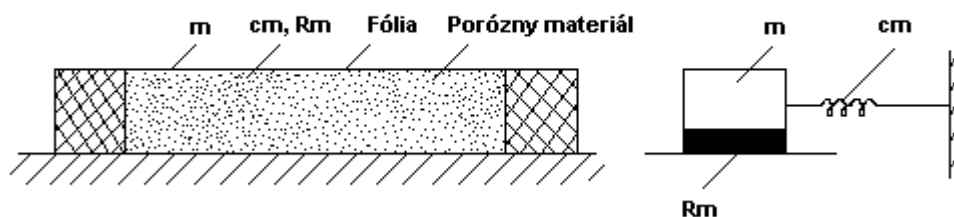
Pôsobením rezonátoru dochádza k útlmu, pretože každý rezonátor premieňa určitú časť zvukovej energie na energiu inú. Ak je rezonančná sústava určená k účinnému pohlcovaniu zvuku, musí byť dostatočne tlmená, aby bolo čo najväčšie množstvo zvukovej energie nahromadenej v rezonátore premené na teplo.



Obr. 5.: Mechanická analógia akustickej rezonančnej sústavy o akustickej hmotnosti m_a , akustickej poddajnosti c_a a akustickom odpore R_a [26]

2.6.2.2.1 Kmitajúce membrány

Kmitajúcu membránu predstavuje doska alebo fólia, ktorej tuhosť v ohybe je nepatrná a je umiestnená v určitej vzdialenosti od pevnej steny, vid' obr. 6. Priestor medzi membránou a zadnou stenou je vyplnený poróznym materiálom, ktorý tlmí kmitanie častíc v tomto priestore a tým aj celú sústavu. Väčšinou sa volí sústava, ktorej ohybová tuhosť je omnoho menšia ako tuhosť vzduchového vankúša. V tom prípade sa bude membrána pohybovať ako celok, podobne ako kmitajúci piest.



Obr. 6.: Rez usporiadaním s kmitajúcou membránou [26]

Rezonančná frekvencia f_r [Hz] netlmenej membrány za predpokladu malej výchylky je určená:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot S}{m \cdot d}}$$

kde m [kg] je hmotnosť membrány, S [m²] je plocha membrány, d [m] predstavuje hrúbku vzduchovej vrstvy a ρ [kg.m⁻³] je hustota vzduchu. [26]

V prípade tenkej homogénnej elastickej fólie napnutej na tuhý kruhový rám získava membrána svoju tuhosť. Radikálne pôsobiaca napínacia sila - vyvolaná napnutím membrány – vztiahnutá na jednotku dĺžky obvodu rámu v [N.m⁻¹] je vo všetkých smeroch konštantná a je daná vzťahom:

$$v = \frac{F_r}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

kde F_r predstavuje celkovú napínaciu silu [N], r je polomer membrány [m].

Rýchlosť priečnej vlny šíriacej sa v membráne je určená:

$$c_M = \sqrt{\frac{v}{m_1}}$$

v [N.m⁻¹] predstavuje napínaciu silu, m_1 [kg.m⁻²] plošnú hmotnosť homogénnej elastickej membrány [27, 28].

2.6.2.2.2 Kmitajúce dosky

Kmitajúca doska sa od membrány líši svojou tuhosťou v ohybe, ktorá je väčšia ako tuhosť vzduchového vankúša. U dosiek sa okrem základných kmitov - piestových, uplatňujú aj kmity vyšších rad – ohybové kmity. Maximum činiteľa zvukovej pohltivosti je v oblasti nízkych kmitočtov. Akustickú impedanciu nie je možné ovplyvňovať poróznym materiálom vo vzduchovom vankúši, pretože mechanické straty

trením v pružnom uložení dosky predstavujú vysokú hodnotu, ktorá nie je vhodná pre správne uloženie.

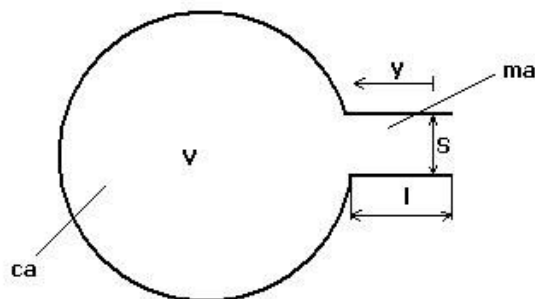
Vlastná frekvencia f_r [Hz] homogénnej obdĺžnikovej dosky o rozmeroch a [m] x b [m] a hrúbke h [m] je daná:

$$f_{p,q} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho S c^2}{m d} + \frac{4 S \pi^2}{m} \cdot \left[\left(\frac{p}{a} \right)^2 + \left(\frac{q}{b} \right)^2 \right]^2 \frac{E h^3}{12(1 - \sigma^2)}}$$

S [m²] je plocha dosky, m [kg] je hmotnosť dosky, E [Pa] modul pružnosti dosky, σ [-] Poissonova konštanta, d [m] vzdialenosť dosky od steny, p a q sú čísla udávajúce mód kmitov [26, 28].

2.6.2.2.3 Helmholtzove rezonátory

Helmholtzove rezonátory používané k pohlcovaniu zvuku môžu byť usporiadané buď jednotlivo, alebo združene do tzv. dierovaných dosiek. Helmholtzov rezonátor je tvorený dutinou objemu V , opatrený hrdlom, v ktorom je určitá hmotnosť, ktorú je možné si predstaviť ako piest. Vlastnosťou objemu je poddajnosť c_a , piest predstavuje akustickú hmotnosť m_a , pohybu piestu je kladený odpor R_a [26, 29].



Obr. 7.: Schematické znázornenie Helmholtzovho rezonátoru [30]

Rezonančná frekvencia f_r [Hz] je daná vzťahom:

$$f = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S_1}{S_2 l d}}$$

kde l [m] je hrúbka steny umiestnená vo vzdialenosti d [m] od pevnej steny, s otvorom o ploche S_1 [m²], každému otvoru odpovedá stena S_2 [m²]. [28, 30]

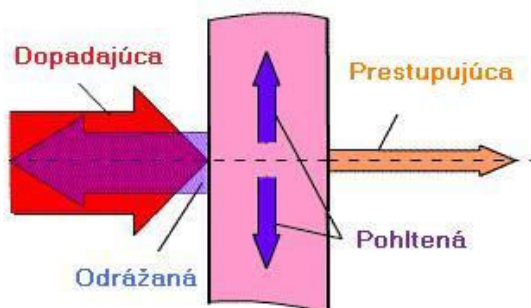
Okrem jednoduchých rezonátorov sa používajú i rezonátory s otvormi kužeľovými, eliptickými, štrbinovými, štrbinovými so šikmými stenami otvorov a iné [26]

2.6.3 ČINITEĽ ZVUKOVEJ POHLTIVOSTI

Schopnosť telesa pohlcovať zvuk je charakterizovaná hodnotou činiteľa zvukovej pohltivosti α [-], ktorý je definovaný vzťahom:

$$\alpha = \frac{W_4}{W_1}$$

Je teda definovaný ako pomer zvukovej energie W_4 pohlcovanej určitou plochou k energii W_1 ktorá na túto plochu dopadá.



Obr. 8.: Odraz a pohlcovanie zvukovej energie [31]

Činiteľ zvukovej pohltivosti je bezrozmerné číslo a jeho veľkosť sa môže pohybovať v intervale od 1 do 0. U steny, ktorá zvuk pohlcuje úplne je rovný jedna, naopak u steny dokonale odrazajúcej sa tento činiteľ rovná nule.

Pohltená energia :

$$W_4 = W_1 - W_3$$

kde W_3 je energia od steny odrazená [26]

2.6.4 STUPEŇ VZDUCHOVEJ NEPRIEZVUČNOSTI

Činiteľ priezvučnosti τ charakterizuje ďalšiu veľmi významnú akustickú vlastnosť materiálu a tou je priezvučnosť. Nakoľko energia zvuku vstupujúca do materiálu (deliacej steny) sa v ňom z časti pohltí a časť vystupuje z materiálu opäť do vzduchu (do priestoru za stenou), je teda činiteľ priezvučnosti vždy menší než činiteľ zvukovej pohltivosti toho istého materiálu (popr. steny), teda $\tau < \alpha$.

Činiteľ priezvučnosti je definovaný pomerom intenzít zvuku I_2 - tesne za stenou a I_1 -tesne pred stenou, za predpokladu, že sa zvuk ďalej šíri do voľného priestoru

$$\tau = \frac{I_2}{I_1}$$

Činiteľ priezvučnosti τ je teda zlomok z celkového dopadajúceho výkonu zvukovej vlny, ktorý prejde na druhú stranu steny.

Inverzný pomer tohto výkonu v logaritmickej miere nazývame stupeň vzduchovej nepriezvučnosti R [26]:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

2.6.5 METÓDY MERANIA Činiteľa ZVUKOVEJ POHLTIVOSTI A VZDUCHOVEJ NEPRIEZVUČNOSTI

Zvuk absorbujúce materiály využívané v miestnostiach a uzatvorených pracovných priestoroch sú určené k redukcii odrážaných zvukov, hlukov, alebo ku kontrole ozvien (odrazov) a tým k zlepšeniu počuteľnosti v miestnostiach. Bežné zvuk absorbujúce materiály – napr. akustické stropné dlaždice, obklady - sú určené k použitiu v kinách, divadlách, nahrávacích a vysielačích štúdiách, továrňach, dielnach atď [33].

2.6.5.1 Dozvuková miestnosť

Testovaná metóda je definovaná normou BS EN ISO 354: 2003 *Akustika – meranie zvuku v dozvukovej miestnosti* [34]. Meranie činiteľa zvukovej pohltivosti v dozvukovej miestnosti zaisťuje dopad zvukového vlnenia vo všetkých smeroch, ktorý odpovedá skutočným podmienkam. V dozvukovej miestnosti je umiestnených viacero reproduktorov a mikrofón. Meria sa doba dozvuku prázdnej dozvukovej miestnosti a následne doba dozvuku s umiestnenou testovanou vzorkou. Z nameraných hodnôt dôb dozvuku je potom určený činiteľ zvukovej pohltivosti. Nevýhodou tejto metódy je potreba veľkej miestnosti s absolútne odrazivými stenami a nutnosť testovaných vzoriek veľkých rozmerov [30].

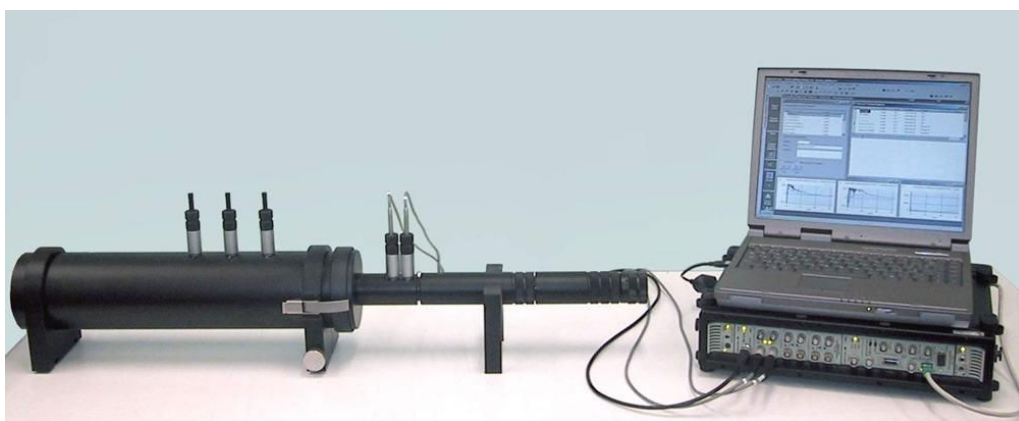
2.6.5.2 Metóda odrážanej vlny

Táto metóda umožňuje určenie činiteľa zvukovej pohltivosti pre rôzne uhly dopadu zvukovej energie. Výhodou je dopad zvukového vlnenia vo všetkých smeroch, ktorý odpovedá skutočným podmienkam a použitie testovaných vzoriek malých rozmerov. Nevýhodou je zamedzenie snímania priameho neodrážaného zvuku a použitie dokonale odrazovej podložky s nulovou pohltivosťou [30].

2.6.5.3 Metóda dvojmikrofónovej impedančnej trubice

Dvojmikrofónová impedančná trubica Brüel & Kjaer typ 4206 zobrazená na obr. 9 je určená k meraniu akustických charakteristík materiálov ako napríklad akustická impedancia a admitancia, zvuková absorbcia, koeficient odrazu, činiteľ zvukovej pohltivosti a nepriezvučnosti a pohybuje sa vo frekvenčnom rozsahu od 50 Hz do 6,4 kHz [35]

Táto metóda je založená na rozklade širokopásmového stacionárneho náhodného signálu na jeho dopadajúcu a odrážajúcu zložku. Signál sa generuje vnútri trubice pomocou zdroja zvuku. Meracia sústava sa skladá z veľkej trubice o priemere 100 mm, malej trubice o priemere 29 mm, generátoru zvukového signálu, analyzátoru signálu. Pre samotnú analýzu sa využíva dvojkanálový signálny analyzátor Brüel & Kjaer typ 2034 a aplikačný software BZ50 zabezpečujúci jednoduchú obsluhu prostredníctvom PC. Metóda je podrobne popísaná v ISO 10534-2 a ASTM E1050 [36].



Obr. 9.: Dvojmikrofónová impedančná trubica Brüel & Kjaer typ 4206 [37]

3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Úlohou experimentálnej časti bolo pripraviť vzorky nanovlákných vrstiev rôznych plošných hmotností pri zmenách rýchlosti odťahu materiálu a výšky nabitej elektródy – výšky zvlákňovania.

V druhej časti experimentu boli vytvorené vzorky podrobené akustickým skúškam. Sledoval sa činiteľ zvukovej pohltivosti a stupeň vzduchovej nepriezvučnosti. Ďalej sa pre každú vzorku stanovila plošná hmotnosť a následne priemerná hodnota ekvivalentného priemeru, špecifický povrch nanovlákennej vrstvy a nakoniec anizotropia nanovlákennej vrstvy v závislosti na plošnej hmotnosti.

3.1 Roztok použitý pri experimente

Pri experimente sa pracovalo s roztokom PVA, ktorý bol pripravený podľa nasledujúceho postupu:

600 ml	PVA (16%)
5,76 ml	glyoxal (40%)
3 ml	H ₃ PO ₄
144 ml	H ₂ O

Do destilovanej vody sa pridal glyoxal a H₃PO₄, táto zmes sa primiešala do potrebného množstva PVA, celý roztok sa dôkladne premiešal a polohoval. Roztok bolo potrebné pripraviť 24 hodín pred vlastným zvlákňovaním, kvôli ustáleniu na teplotu miestnosti a odstráneniu napenenia.

Špecifikácia použitého PVA roztoku:

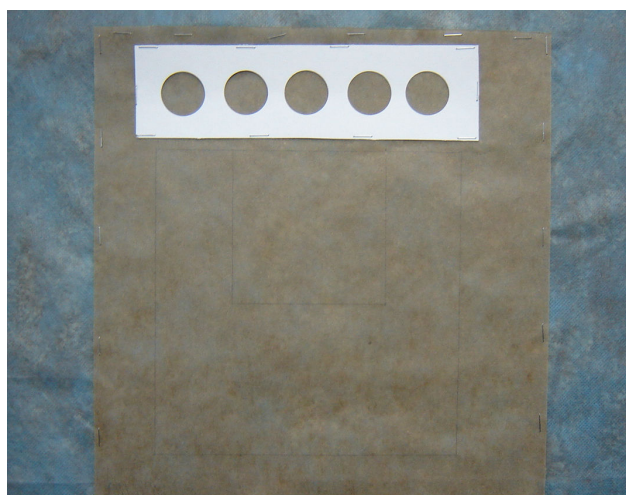
Dodávateľom použitého polymérneho roztoku je firma SLOVIOL R-NCHZ Slovakia. Jedná sa o vodný roztok s koncentráciou 16 % a molekulovou hmotnosťou roztoku ≈ 60000 g/mol [32].

3.2 Príprava podkladového materiálu

Pred procesom zvlákňovania bolo potrebné pripraviť podkladový materiál, na ktorý sa pri zvlákňovaní prichytávala vlákenná vrstva. Postupovalo sa následovne:

Na výkres sa narysovali sústredné kružnice o vnútornom priemere 29 mm a vonkajšom priemere 34 mm. Následne sa vnútorný kruh vyrazil pomocou kovovej raznice.

Na netkanú textíliu – spun - bond, sa napolochoval voskovaný papier (kvôli dobrému odlepeniu vzniknutej nanovlákennej vrstvy) a výkres s vyrezanými otvormi. Takto pripravené vrstvy sa navzájom spojili kancelárskymi sponkami (vid' obr. 10)



Obr.10.: Podkladový materiál pripravený k zvlákňovaniu

3.3 Výroba nanovlákennej vrstvy

Pri výrobe nanovlákennej vrstvy bol použitý prístroj Nanospider, ktorého funkcia je podrobne popísaná v kapitole 2.4.

Pred vlastným zvlákňovaním bolo potrebné zistiť maximálnu hodnotu napätia pri najvyššej možnej vzdialenosti nabitej elektródy od protielektródy (130 mm), pri ktorom sa ešte tvorila nanovláknenná vrstva a nedochádzalo k tvorbe výbojov a tým k prerušovaniu zvlákňovania. Pomocou zistenej hodnoty sa následne vypočítali príslušné hodnoty napätí pre ostatné vzdialenosti elektródy – a to pre 50, 70, 90 a 110 mm.

Všetky hodnoty napätí a k nim odpovedajúce hodnoty prúdov sú uvedené v tabuľke 3.

	Hodnoty prúdu a napätia v závislosti na výške zvlákňovania									
	50 [mm]		70 [mm]		90 [mm]		110 [mm]		130 [mm]	
Rýchlosť Odvádzania [Hz]	kV	mA	kV	mA	kV	mA	kV	mA	kV	mA
2x2	23	0.20	32	0,20	41,5	0,24	50,7	0,31	60	0,34
2	23	0.21	32	0,20	41,5	0,25	50,9	0,29	60,3	0,33
5	24	0.21	32	0,23	41,5	0,22	50,9	0,28	60,3	0,33
7	23	0.20	32	0,22	41,5	0,22	50,9	0,29	60,3	0,33
10	23.5	0.22	32	0,22	41,5	0,23	50,9	0,28	60,3	0,34

Tab. 3.: Tabuľka hodnôt prúdov a napätí k odpovedajúcim výškam zvlákňovania

Po zistení hodnôt napätí nasledovalo samotné zvlákňovanie. Podkladový materiál bol navedený do stroja, zásobovacia vanička sa naplnila roztokom polyméru a nastavila sa potrebná vzdialenosť nabitej elektródy od protielektródy (výška zvlákňovania - meraná od osi elektródy). Po zapnutí stroja sa nastavilo napätie odpovedajúce zvlákňovanej výške a taktiež rýchlosť odvádzania vznikajúcej nanovlákennej vrstvy. Výška zvlákňovania bola postupne nastavená na 50, 70, 90, 110 a 130 mm a rýchlosť odťahu na 2x2, 2, 5, 7 a 10 Hz. Priebežne bola prevádzaná kontrola, či zariadenie pracuje pri stanovenej hodnote napätia a zároveň sa zaznamenávali odpovedajúce hodnoty prúdov. Vznikajúca nanovláknenná vrstva, priťahovaná záporne nabitou elektródou, sa zachytávala na spodnej strane podkladového materiálu umiestneného pod protielektródou. Po vytvorení nanovlákennej vrstvy pri zvolenej výške zvlákňovania a po zmene všetkých rýchlostí odťahu sa zmenila výška zvlákňovania a opäť sa zvlákňovalo pri všetkých odťahových rýchlostiach.

Relatívna vlhkosť v potrubí bola udržiavaná na 36 %, pri jej zvýšení bola zapnutá klimatizácia, ktorá ju udržiavala na konštantnej hodnote. Teplota miestnosti počas zvlákňovania bola v rozmedzí 21 – 22 °C.

Rôznou odťahovou rýchlosťou vznikali nanovláknenné vrstvy s rôznymi plošnými hmotnosťami. Zmena výšky zvlákňovania mala vplyv na tvorbu vlákien rôznych priemerov.

Podklad so vzniknutými nanovláknennými vrstvami sa uchoval pre ďalšiu analýzu.

Po vytvorení nanovláknenných vrstiev sa vzorky zväžili a pre každú z nich sa stanovila plošná hmotnosť. Pruh výkresu s vyrezanými otvormi, na ktorom bola nanosená vrstva nanovláknien sa vystrihol a následne sa na ňom prevádzali akustické skúšky, ktoré sú popísané v kapitolách 3.4.4.1 a 3.4.4.2.



Obr. 11.: Tvorba nanovlákennej vrstvy

3.4 Metódy spracovania vzoriek a výsledkov

3.4.1 STANOVENIE PLOŠNEJ HMOTNOSTI VZORIEK

Po vytvorení nanovláknenných vrstiev sa vzorky zväžili a pre každú z nich sa stanovila plošná hmotnosť. Hodnoty plošných hmotností pre všetky vzorky sú uvedené v tabuľke 4.

	Rýchlosť odvádzania [Hz]				
Vzdialenosť elektródy [mm]	2x2	2	5	7	10
50	0,2102	0,1351	0,0473	0,0244	0,0231
70	0,2153	0,1582	0,0655	0,0433	0,0386
90	0,3437	0,1925	0,0714	0,0673	0,0432
110	0,3383	0,1884	0,0653	0,0428	0,0227
130	0,3306	0,1851	0,0667	0,0602	0,0374

Tab. 4.: Tabuľka hodnôt plošných hmotností [g.cm^{-2}] pri rôznych vzdialenostiach elektródy a rýchlostiach odvádzania

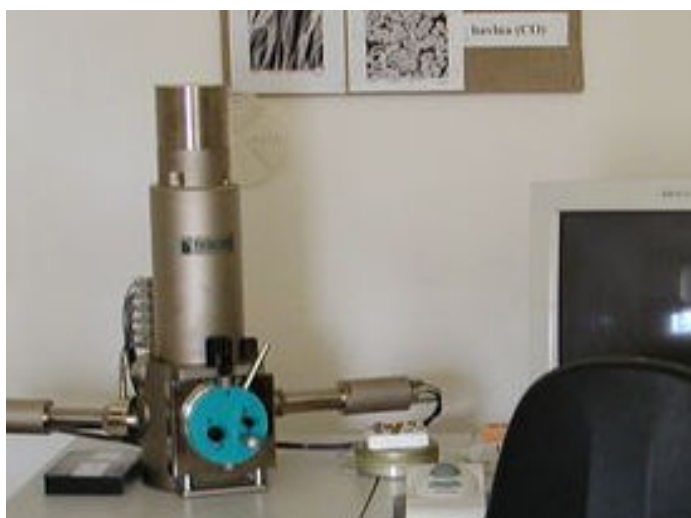
Odťahová rýchlosť [Hz]	Odťahová rýchlosť [m.min ⁻¹]
2x2	0,0342
2	0,0342
5	0,0855
7	0,1197
10	0,171

Tab. č. 5.: Prepočítané hodnoty odťahových rýchlostí na ich skutočnú rýchlosť [m.min⁻¹]

Poznámka: Odťahová rýchlosť 2x2 Hz znamená, že príslušná vzorka bola odťahovaná rýchlosťou 2 Hz, po zvláknení sa stroj zastavil a vrátil späť na počiatok vzorky a opäť sa zvlákňovalo rýchlosťou 2 Hz. Aj z toho dôvodu je v tabuľke 5 pri odťahovej rýchlosti 2x2 Hz uvedená rovnaká skutočná rýchlosť ako pri odťahovej rýchlosti 2 Hz. Pre lepšiu prehľadnosť sa v práci aj naďalej používalo značenie odťahových rýchlostí v Hz.

3.4.2 SPRACOVANIE VZORIEK POMOCOU ELEKTRÓNOVÉHO MIKROSKOPU

Vzorky nanovláknenných vrstiev získaných pri experimente popísanom v kapitole 3.3 sa následne spracovali na elektrónovom rastrovom mikroskope. Bol použitý mikroskop VEGA – TESCAN, ktorý je zobrazený na obr. 12.



Obr. 12.: Rastrovací elektrónový mikroskop VEGA – TESCAN [41]

3.4.2.1 Postup práce na elektrónovom mikroskope

Zo vzniknutej nanovlákennej vrstvy odpovedajúcej plošnej hmotnosti sa opatrne vystrihla malá vzorka tak, aby nedošlo k poškodeniu vlákien. Tá sa prilepila na podkladové teliesko, ktoré bolo umiestnené do práškovacieho zariadenia, kde sa na vzorku naniesla vrstva zlatého prášku, aby sa nanovlákenná vrstva neporušila. Takto pripravená vzorka sa vložila do elektrónového mikroskopu a nasledovalo vlastné meranie, pri ktorom sa získali potrebné snímky nanovlákenných vrstiev, na ktorých boli prevádzané ďalšie merania.

3.4.3 MERANIE EKVIVALENTNÉHO PRIEMERU NANOVLÁKIEN

Ekvivalentný priemer nanovlákien sa zisťoval na prístroji Lucia G, ktorý je umiestnený na katedre netkaných textílií. Pre každú vzorku určitej plošnej hmotnosti bolo nameraných 150 hodnôt priemerov nanovlákien, z ktorých sa následne vypočítali stredné hodnoty ekvivalentných priemerov a k nim odpovedajúce smerodajné odchýlky. Získané data boli zoradené do prehľadnej tabuľky (viď Tab. 6)

Odt'ahová rýchlosť [Hz] / Výška zvlákňovania [mm]	Plošná hmotnosť vzorky [g.cm⁻²]	Priemer vlákien [nm]	Smerodajná odchýlka [nm]	Minimum	Maximum
2x2 / 50	0,2102	88,03	17,90	53	152
2x2 / 70	0,2153	88,71	17,46	56	148
2x2 / 90	0,3437	86,64	17,40	54	135
2x2 / 110	0,3383	78,98	13,76	51	112
2x2 / 130	0,3306	79,87	11,61	56	109
2 / 50	0,1351	86,60	18,13	45	124
2 / 70	0,1582	82,93	17,50	46	137
2 / 90	0,1925	85,25	13,18	56	114
2 / 110	0,1884	73,12	11,89	47	102
2 / 130	0,1851	72,24	12,01	45	102
5 / 50	0,0473	85,11	18,49	52	126
5 / 70	0,0655	82,34	14,10	52	119
5 / 90	0,0714	77,21	13,95	44	108
5 / 110	0,0653	77,09	15,20	53	121
5 / 130	0,0667	70,55	13,51	45	120
7 / 50	0,0244	79,89	18,08	46	123
7 / 70	0,0433	77,63	14	47	110
7 / 90	0,0673	76,25	14,95	51	120
7 / 110	0,0428	73,27	12,9	48	108
7 / 130	0,0602	68,59	12,67	43	110
10 / 50	0,0231	72,50	12,62	48	110
10 / 70	0,0386	69,87	14,90	45	101
10 / 90	0,0432	71,94	14,34	51	124
10 / 110	0,0227	71,66	13,15	46	104
10 / 130	0,0374	65,42	9,60	45	91

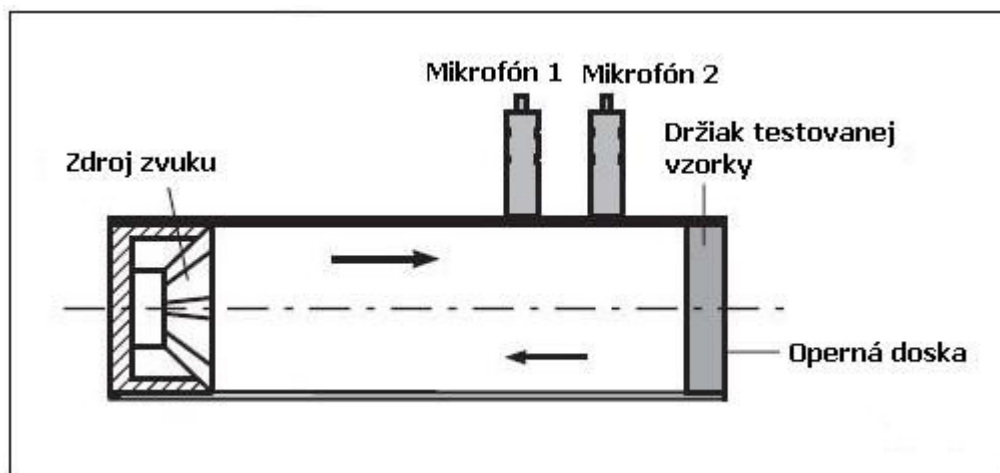
Tab. 6.: Hodnoty ekvivalentných priemerov vlákien odpovedajúcich plošných hmotnosti

3.4.4 STANOVENIE ČINITEL'A ZVUKOVEJ POHLTIVOSTI A VZDUCHOVEJ NEPRIEZVUČNOSTI

K meraniu činiteľa zvukovej pohltivosti a stupňa vzduchovej nepriezvučnosti bola použitá dvojmikrofónová impedančná trubica, umiestnená na Katedre vozidiel a motorov. Činiteľ zvukovej pohltivosti bol meraný metódou dvojmikrofónovej prenosovej funkcie (viď. kapitola 3.4.4.1) a stupeň vzduchovej nepriezvučnosti metódou štvormikrofónovej prenosovej funkcie (viď. kapitola 3.4.4.2).

3.4.4.1 Metóda dvojmikrofónovej prenosovej funkcie

K určení činiteľa zvukovej pohltivosti sa využíva metóda dvojmikrofónovej prenosovej funkcie. Meracie zariadenie pozostáva zo zdroja zvuku – reproduktoru, ktorý je umiestnený na jednom konci impedančnej trubice a vzorka materiálu je umiestnená na konci druhom (viď obr. 13).

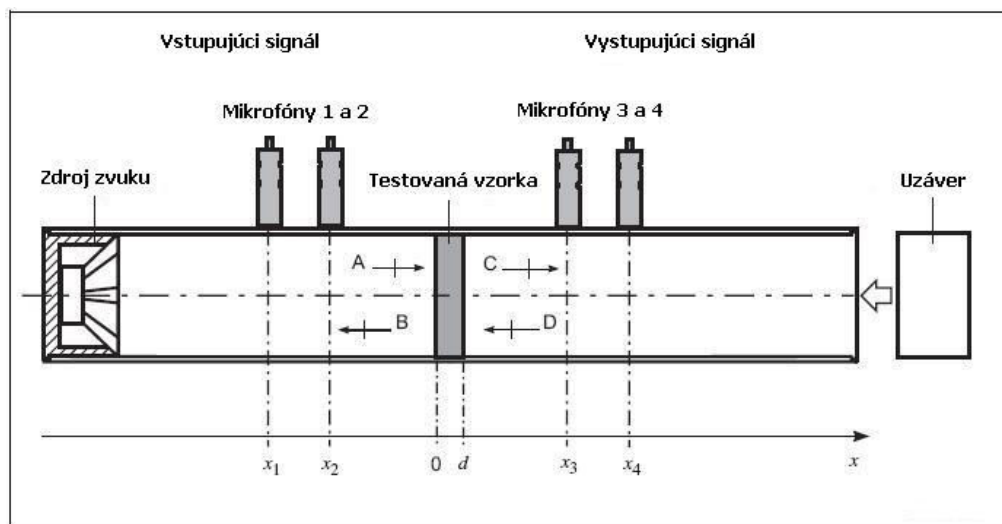


Obr.13.: Rez impedančnou trubicou – princíp dvojmikrofónovej prenosovej funkcie [36]

Zdroj zvuku vytvára širokopásmové stacionárne náhodné zvukové vlny, ktoré sa šíria ako jednoduché rovinné vlny v trubici, zasahujú testovanú vzorku a sú odrážané. Mikrofóny, ktoré sú umiestnené na stene trubice snímajú zložky dopadajúceho a odraženého akustického tlaku na dvoch stálych miestach. Výpočtom komplexnej prenosovej funkcie za využitia dvoj-kanálového digitálneho frekvenčného analyzátoru, je možné určiť koeficient zvukovej pohltivosti, komplexný odrazový koeficient a normálovú akustickú impedanciu materiálu. Potrebný frekvenčný rozsah závisí na priemere trubice a na vzdialenosti medzi dvoma umiestnenými mikrofónmi [36].

3.4.4.2 Metóda štvormikrofónovej prenosovej funkcie

Činiteľ vzduchovej nepriezvučnosti je určovaný metódou štvormikrofónovej prenosovej funkcie. Zdroj zvuku - reproduktor je umiestnený na jednom konci impedančnej trubice a vzorka materiálu je upevnená do držiaku (viď obr. 14).



Obr. 14.: Rez impedančnou trubicou – princíp štvormikrofónovej prenosovej funkcie

Reproduktor vytvára širokopásmové stacionárne náhodné zvukové vlny, ktoré sa šíria ako vlny rovinné. Tieto vlny narážajú na vzorku upevnenú v držiaku, časť vln sa odrazí späť do zdrojovej trubice, časť je pohltená materiálom – testovanou vzorkou - a ďalšia časť prechádza materiálom do prijímajúcej trubice, kde narazia na jej koniec, niektoré z nich sú opäť odrazené a niektoré prejdú trubicou von. Akustický tlak sa meria na štyroch stálych polohách. Výpočtom komplexnej prenosovej funkcie za pomoci štvor - kanálového digitálneho frekvenčného analyzátoru sa určí činiteľ vzduchovej nepriezvučnosti [36].

Pri meraní činiteľa zvukovej pohltivosti boli do trubice postupne vkladané všetky vzorky. Pred každým meraním sa previedla kalibrácia prístroja, nakoľko každá vzorka mala inú plošnú hmotnosť a vzorky sa teda líšili hrúbkou nanovlákennej membrány. Odrazová stena bola pomocou pohyblivého piestu nastavená do vzdialenosti 30 mm od nanovlákennej vrstvy. Získané výsledky boli pre lepšiu prehľadnosť spracované v programe Excel a následne spracované do grafov.

Stupeň vzduchovej nepriezvučnosti bol meraný na rovnakých vzorkách ako činiteľ zvukovej pohltivosti. Pred prvým meraním bola prevedená kalibrácia prístroja. Vzorka bola testovaná najprv pri otvorenej trubicu a následne pri trubici uzatvorenej. Výsledky boli taktiež spracované pomocou programu Excel a vynesené do grafov.

3.4.5 ANIZOTROPIA NANOVLÁKENNÝCH VRSTIEV

Anizotropia je vlastnosťou smerovej závislosti, predstavuje rôzne vlastnosti materiálu v rôznych smeroch. Anizotropia je opakom izotropie, ktorá znamená homogenitu vo všetkých smeroch materiálu [38].

Jednou z metód pre hodnotenie anizotropie rovinných vlákenných systémov je pomocou priesečníkovej ružice, z ktorej sa následne grafickou konštrukciou zhotoví smerová ružica. Postup pre určenie smerovej ružice pomocou Steinerovho kompaktu:

- 1) Cez študovanú štruktúru sa preloží sieť uhlov, ktorá je narysovaná na priesvitnom papieri, alebo fólii.
- 2) Zistí sa počet priesečníkov siete uhlov so sledovanou štruktúrou. Meranie sa opakuje v rôznych miestach skúmaného objektu bez zmeny orientácie siete uhlov alebo vlákenného projektu.
- 3) Hodnoty počtu priesečníkov sa vynášajú do polárneho diagramu – priesečníkovej ružice, ktorý je pootočený oproti sieti uhlov o $\pi/2$.
- 4) V koncových bodoch priesečníkovej ružice sa vztýčia kolmice, ktoré vymedzia v rovine mnohouholník – Steinerov kompakt
- 5) Vzdialenosť vrcholov mnohouholníka určuje hodnoty textúrnej funkcie pre smery súhlasné so smermi strán Steinerovho kompaktu.
- 6) Nakoniec sa skonštruuje výsledná smerová ružica [39, 40]

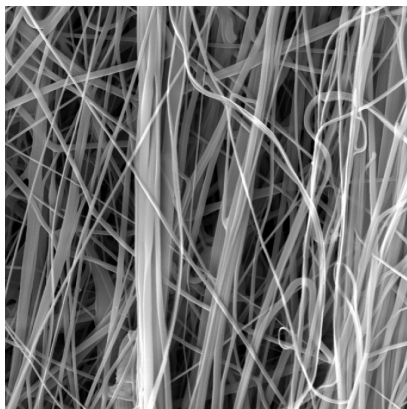
Na nanovláknenných vrstvách bol počet priesečníkov vlákien zisťovaný na 4 miestach tak, aby bola pokrytá celá plocha vrstvy. Potom sa pre každú vzorku podľa vyššie uvedeného postupu narysovala smerová ružica. Pre porovnanie boli smerové ružice vykreslené v programe Matlab pomocou Fourierovej transformácie. Presný postup, podľa ktorého bola Fourierová transformácia naprogramovaná, je uvedený v prílohe číslo 2.

Pre porovnanie sú uvedené obrázky smerových ružíc pre vlákennú vrstvu s plošnou hmotnosťou $0,2102 \text{ [g.cm}^{-2}\text{]}$, ktorá vznikla odťahovou rýchlosťou $2 \times 2 \text{ Hz}$ pri výške zvlákňovania 50 mm a vlákennej vrstvy s plošnou hmotnosťou $0,3306 \text{ [g.cm}^{-2}\text{]}$, ktorá vznikla pri rovnakej odťahovej rýchlosti a výške zvlákňovania 130 mm . Všetky

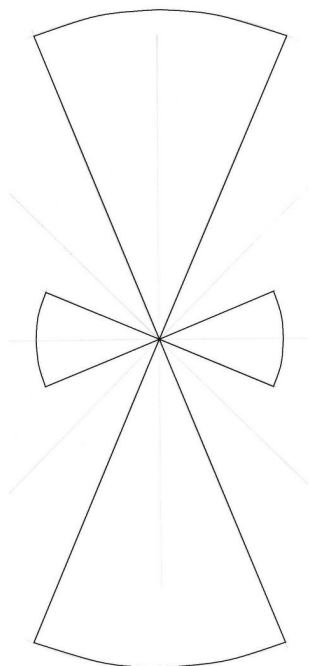
smerové ružice a príslušné smerové ružice podľa Fourierovej transformácie boli pre dobrú názornosť usporiadané a sú uvedené v prílohe číslo 1.

Odtáhová rýchlosť 2x2 Hz, vzdialenosť protielektródy 50 mm

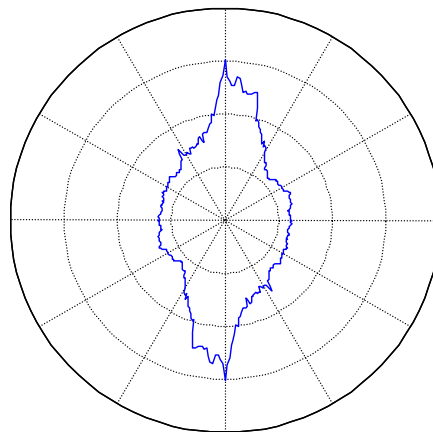
Plošná hmotnosť vzorky 0,2102 [g.cm⁻²]



Smerová ružica - Steiner

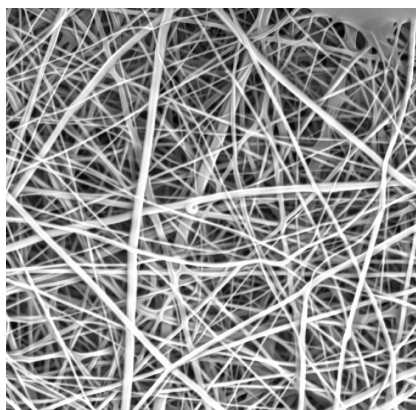


Fourierova transformácia

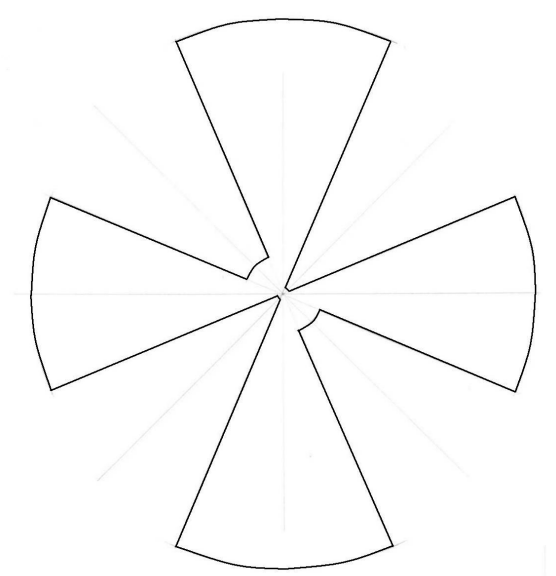


Odtáhová rýchlosť 2x2 Hz, vzdialenosť protielektródy 130 mm

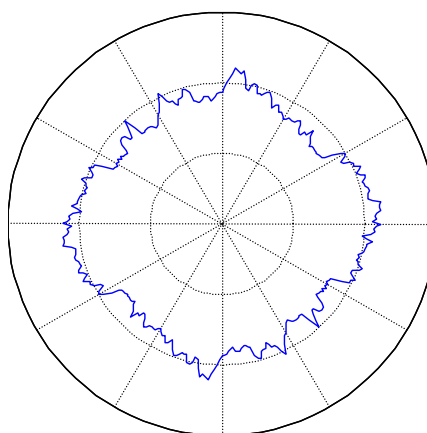
Plošná hmotnosť vzorky 0,3306 [g.cm⁻²]



Smerová ružica - Steiner



Fourierova transformácia



Z uvedených obrázkov je možné si všimnúť, že pri zvýšení výšky zvlákňovania pri rovnakej odtáhovej rýchlosti dôjde k výraznej zmene anizotropie. Kým v prvom prípade (pri výške zvlákňovania 50 mm) sú vlákna vo vláknennej vrstve usporiadané väčšinou do jedného smeru (skoro paralelne), pri zvýšení výšky zvlákňovania (na 130 mm) sú vlákna usporiadané do všetkých smerov.

3.4.6 ŠPECIFICKÝ POVRCH NANOVLÁKENNEJ VRSTVY

Z hodnôt ekvivalentných priemerov nanovláken sa vypočítal špecifický povrch nanovlákennej vrstvy podľa vzťahu:

$$P_{sp} = \frac{2}{r \cdot \rho}$$

kde r [nm] je polomer nanovláken, $\rho = 1,041$ [g.cm⁻³] je hustota PVA roztoku.

Špecifický povrch sa vypočítal pre každú vzorku a výsledky boli zhrnuté do tabuliek číslo 7, 8 a 9.

Odťahová rýchlosť 2x2 Hz		Odťahová rýchlosť 2 Hz	
Plošná hmotnosť [g.cm ⁻²]	Špecifický povrch [m ² . kg ⁻¹]	Plošná hmotnosť [g.cm ⁻²]	Špecifický povrch [m ² . kg ⁻¹]
0,2102	4,36 . 10 ⁴	0,1351	4,24 . 10 ⁴
0,2153	4,34 . 10 ⁴	0,1582	4,64 . 10 ⁴
0,3437	4,44 . 10 ⁴	0,1925	4,50 . 10 ⁴
0,3383	4,86 . 10 ⁴	0,1884	5,26 . 10 ⁴
0,3306	4,82 . 10 ⁴	0,1851	5,32 . 10 ⁴

Tab. 7.: Tabuľka hodnôt špecifického povrchu pre rôzne plošné hmotnosti vzoriek vyrobené pri odťahových rýchlostiach 2x2 a 2 Hz

Odťahová rýchlosť 5 Hz		Odťahová rýchlosť 7 Hz	
Plošná hmotnosť [g.cm ⁻²]	Špecifický povrch [m ² . kg ⁻¹]	Plošná hmotnosť [g.cm ⁻²]	Špecifický povrch [m ² . kg ⁻¹]
0,0473	4,52 . 10 ⁴	0,0244	4,82 . 10 ⁴
0,0655	4,66 . 10 ⁴	0,0433	4,94 . 10 ⁴
0,0714	4,98 . 10 ⁴	0,0673	5,04 . 10 ⁴
0,0653	4,98 . 10 ⁴	0,0428	5,24 . 10 ⁴
0,0667	5,44 . 10 ⁴	0,0602	5,60 . 10 ⁴

Tab. 8.: Tabuľka hodnôt špecifického povrchu pre rôzne plošné hmotnosti vzoriek vyrobené pri odťahových rýchlostiach 5 a 7 Hz

Odtáhová rýchlosť 10 Hz	
Plošná hmotnosť [g.cm ⁻²]	Špecifický povrch [m ² . kg ⁻¹]
0,0231	5,30 . 10 ⁴
0,0386	5,50 . 10 ⁴
0,0432	5,34 . 10 ⁴
0,0227	5,36 . 10 ⁴
0,0374	5,88 . 10 ⁴

Tab. 9.: Tabuľka hodnôt špecifického povrchu pre rôzne plošné hmotnosti vzoriek vyrobené pri odtáhovej rýchlosti 10 Hz

Z výsledkov hodnôt špecifických povrchov uvedených v tabuľkách 7, 8 a 9 vyplýva, že so zvyšujúcou sa rýchlosťou odvádzania nanovlákennej vrstvy počas jej výroby sa zvyšuje aj hodnota špecifického povrchu nanovlákennej vrstvy. Na hodnotu špecifického povrchu má vplyv aj zvyšovanie výšky zvlákňovania. Jej zväčšovaním hodnota špecifického povrchu taktiež stúpa.

4 VÝSLEDKY A DISKUSIE

4.1 Zmena plošnej hmotnosti nanovláknenných vrstiev

Na zmenu plošnej hmotnosti nanovláknenných vrstiev majú najväčší vplyv odťahová rýchlosť nanovláknenej vrstvy a zmena výšky zvlákňovania.

Zvyšovaním rýchlosti odťahu pri rovnakej výške zvlákňovania dochádza k znižovaniu plošnej hmotnosti vzoriek. Pri rýchlosti odťahu 2x2 Hz a výške zvlákňovania 50 mm má plošná hmotnosť hodnotu $0,2102 \text{ g.cm}^{-2}$, zvýšením odťahovej rýchlosti na hodnotu 5 Hz pri tej istej výške zvlákňovania (50 mm) klesne hodnota plošnej hmotnosti na $0,0473 \text{ g.cm}^{-2}$. Pri odťahovej rýchlosti 10 Hz je hodnota plošnej hmotnosti $0,0231 \text{ g.cm}^{-2}$ (viď tab. č. 4.)

Naopak zmenou výšky zvlákňovania pri rovnakej odťahovej rýchlosti materiálu dochádza k zvyšovaniu plošnej hmotnosti. Pri rýchlosti odťahu 2x2 Hz a výške zvlákňovania 50 mm je hodnota plošnej hmotnosti $0,2102 \text{ g.cm}^{-2}$. Zvýšením výšky zvlákňovania na 130 mm pri nezmenenej rýchlosti odťahu stúpne hodnota plošnej hmotnosti na $0,3306 \text{ g.cm}^{-2}$ (V tomto prípade došlo k niekoľkým výchyľkám, ktoré mohli byť dané nedokonalosťou metódy stanovenia plošnej hmotnosti).

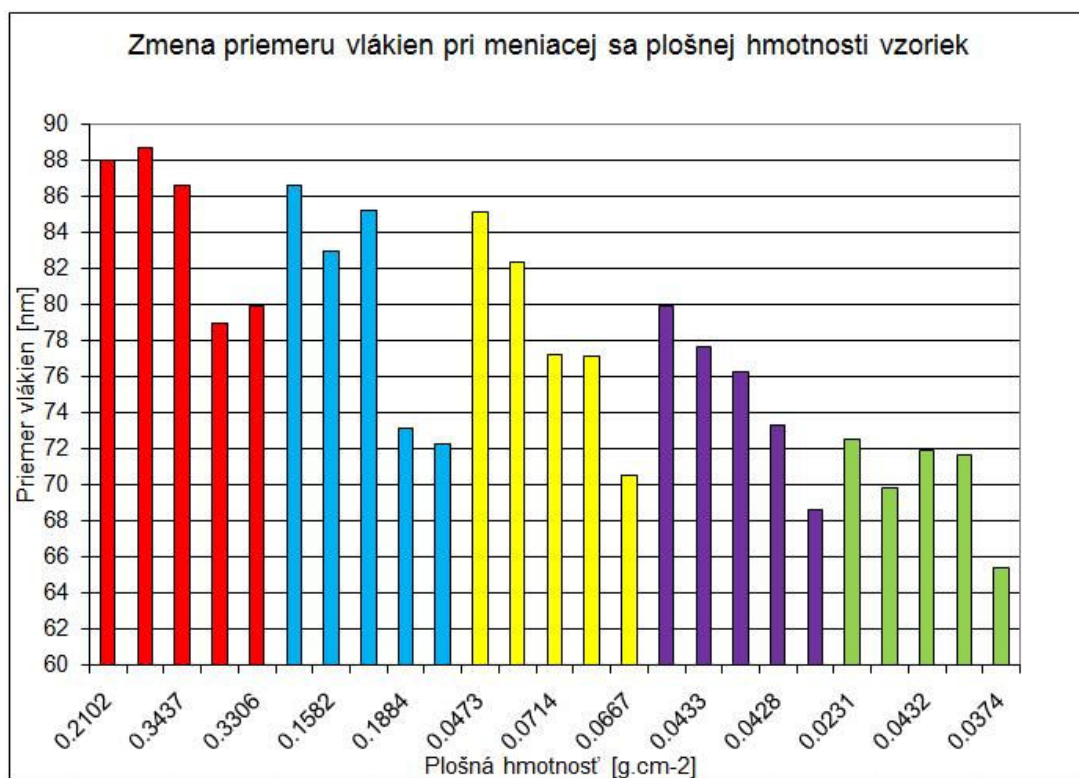
4.2 Zmena ekvivalentného priemeru nanovlákien

Na zmenu ekvivalentného priemeru nanovlákien má taktiež vplyv rýchlosť odťahu materiálu a výška zvlákňovania. Obidve veličiny vedú k znižovaniu hodnôt ekvivalentného priemeru nanovlákien

Zvýšením rýchlosti odťahu sa znižuje hodnota ekvivalentného priemeru. Pri odťahu 2x2 Hz a výške zvlákňovania 50 mm je hodnota ekvivalentného priemeru 88,03 nm. Pri zmene rýchlosti na 10 Hz a zostavajúcej výške zvlákňovania klesne hodnota ekvivalentného priemeru na 72,50 nm. Preto sa výsledky zmeny ekvivalentného priemeru vyhodnocovali vždy v rámci jednej plošnej hmotnosti vzoriek (odťahovej rýchlosti) pre rôzne vzdialenosti zvlákňovacích elektród.

Pri odťahovej rýchlosti 2x2 Hz a výške 50 mm je hodnota ekvivalentného priemeru 88,03 nm. Zmenou výšky zvlákňovania na 130 mm pri rovnakej odťahovej rýchlosti klesne hodnota ekvivalentného priemeru na 79,87 nm (viď tabuľka č. 6).

Odťahová rýchlosť aj výška zvlákňovania vedú k znižovaniu hodnôt ekvivalentného priemeru nanovláken.



Graf č. 1.: Zmena priemeru vlákien pri meniacej sa odťahovej rýchlosti a výške zvlákňovania

- Odťahová rýchlosť 2x2 Hz, výška zvlákňovania – 50, 70, 90, 110 a 130 mm
- Odťahová rýchlosť 2 Hz, výška zvlákňovania – 50, 70, 90, 110 a 130 mm
- Odťahová rýchlosť 5 Hz, výška zvlákňovania – 50, 70, 90, 110 a 130 mm
- Odťahová rýchlosť 7 Hz, výška zvlákňovania – 50, 70, 90, 110 a 130 mm
- Odťahová rýchlosť 10 Hz, výška zvlákňovania – 50, 70, 90, 110 a 130 mm

4.3 Vplyv plošnej hmotnosti na priebeh frekvenčnej závislosti činiteľa zvukovej pohltivosti a stupňa vzduchovej nepriezvučnosti

Hodnoty získané pri meraní činiteľa zvukovej pohltivosti metódou dvojmikrofónovej prenosovej funkcie boli pre dobrú prehľadnosť spracované v programe Excel a následne vynesené do grafov. Pre každú vzorku určitej plošnej hmotnosti bol spracovaný jeden graf. Z grafického spracovania priebehu činiteľa zvukovej pohltivosti v závislosti na príslušnej frekvencii boli zisťované hodnoty rezonančných frekvencií. Rezonančné frekvencie a k nim odpovedajúce hodnoty činiteľa zvukovej pohltivosti boli odčítané z príslušného grafu ako vrcholy kmitov krivky. Odčítavali sa vrcholy len najvýznamnejších rezonančných frekvencií. Príklad odčítavania je uvedený na obrázku číslo 15 (body na vrcholoch kriviek), presné číselné hodnoty rezonančných frekvencií a k nim odpovedajúce hodnoty činiteľov zvukovej pohltivosti boli spracované do tabuľky (viď tab. č. 10). Jedná sa o vzorku s plošnou hmotnosťou $0,1351 \text{ g.cm}^{-2}$, vyrobenú pri rýchlosti odťahu materiálu 2 Hz a výške zvlákňovania 50 mm.



Obr. č. 15.: Odčítavanie rezonančných frekvencií

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1180	0,928
1860	0,682
2700	0,762
3830	0,492
6130	0,326

Tab. č. 10.: Hodnoty rezonančných frekvencií a k nim odpovedajúce hodnoty činiteľa zvukovej pohltivosti

Ako je možné z grafu povšimnúť si, hodnoty frekvencií sú zaznamenávané od 100 Hz. V rozmedzí od 100 do 600 Hz sú však hodnoty činiteľa zvukovej pohltivosti minimálne, čo je dané hrúbkou použitej nanovlákennej membrány. Krivky začínajú vykazovať stúpajúci charakter až pri hodnote frekvencií približne 600 Hz. Najprv stúpajú do určitej maximálnej hodnoty, potom začínajú klesať a v nasledujúcom úseku vykazuje väčšina kriviek opäť stúpajúci charakter. Týmto neustálym stúpaním a klesaním sa tvoria vrcholy krivky, ktoré sú dôležité pre odčítavanie hodnôt rezonančných frekvencií. Každá krivka neustále kmitá na celom svojom priebehu.

Plošná hmotnosť vytvorených nanovlákenných vzoriek výrazne ovplyvňuje zvukovo pohltivé vlastností nanovlákenných membrán.



Graf č. 2.: Priebeh činiteľa zvukovej pohltivosti v závislosti na frekvencii, plošná hmotnosť vzorky 0,2102 g.cm⁻²

Na grafe číslo 2 je zobrazený priebeh činiteľa zvukovej pohltivosti v závislosti na frekvencii, nanovláknenná membrána má plošnú hmotnosť 0,2102 g.cm⁻². Vzorka bola vyrobená zvlákňovaním pri odťahovej rýchlosti 2x2 Hz a výške zvlákňovania 50 mm. Presné hodnoty činiteľov zvukovej pohltivosti pre danú vzorku sú uvedené v tabuľke 11.

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1140	0,478
1880	0,642
2490	0,722
3440	0,418
4140	0,402
6400	0,661

Tab. č. 11.: Hodnoty rezonančných frekvencií a činiteľov zvukových pohltivostí pre vzorku s plošnou hmotnosťou 0,2102 g.cm⁻²

Z uvedenej tabuľky vyplýva, že hodnoty činiteľa zvukovej pohltivosti sa pohybujú v rozmedzí od 0,4 po 0,7. Maximálna hodnota je 0,722 pri frekvencii 2490 Hz.

Na grafe číslo 3 a v tabuľke 12 sú uvedené hodnoty činiteľov zvukovej pohltivosti pre vzorku s plošnou hmotnosťou $0,0231 \text{ g.cm}^{-2}$. Vzorka bola vyrobená pri odťahovej rýchlosti 10 Hz a výške zvlákňovania 50 mm. (Táto vzorka predstavuje zároveň vzorku s najnižšou plošnou hmotnosťou spomedzi všetkých vytvorených nanovlákných vrstiev).



Graf č. 3.: Priebeh činiteľa zvukovej pohltivosti v závislosti na frekvencii, plošná hmotnosť vzorky $0,0231 \text{ g.cm}^{-2}$

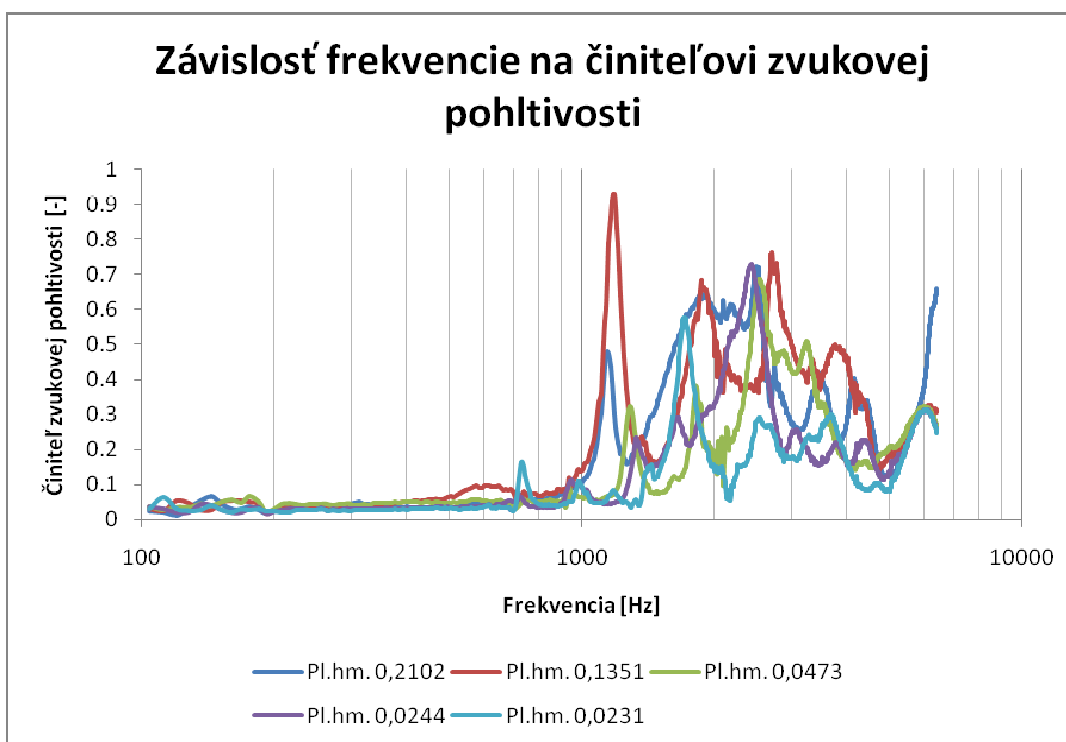
Rezonančná frekvencia $f \text{ [Hz]}$	Činiteľ zvukovej pohltivosti $\alpha \text{ [-]}$
728	0,163
1700	0,576
3680	0,299
6000	0,312

Tab. č. 12.: Hodnoty rezonančných frekvencií a činiteľov zvukových pohltivostí pre vzorku s plošnou hmotnosťou $0,0231 \text{ g.cm}^{-2}$

Hodnoty činiteľov zvukovej pohltivosti sa pohybujú v rozmedzí od 0,1 po 0,5. Maximálna hodnota je 0,576 pri frekvencii 1700 Hz.

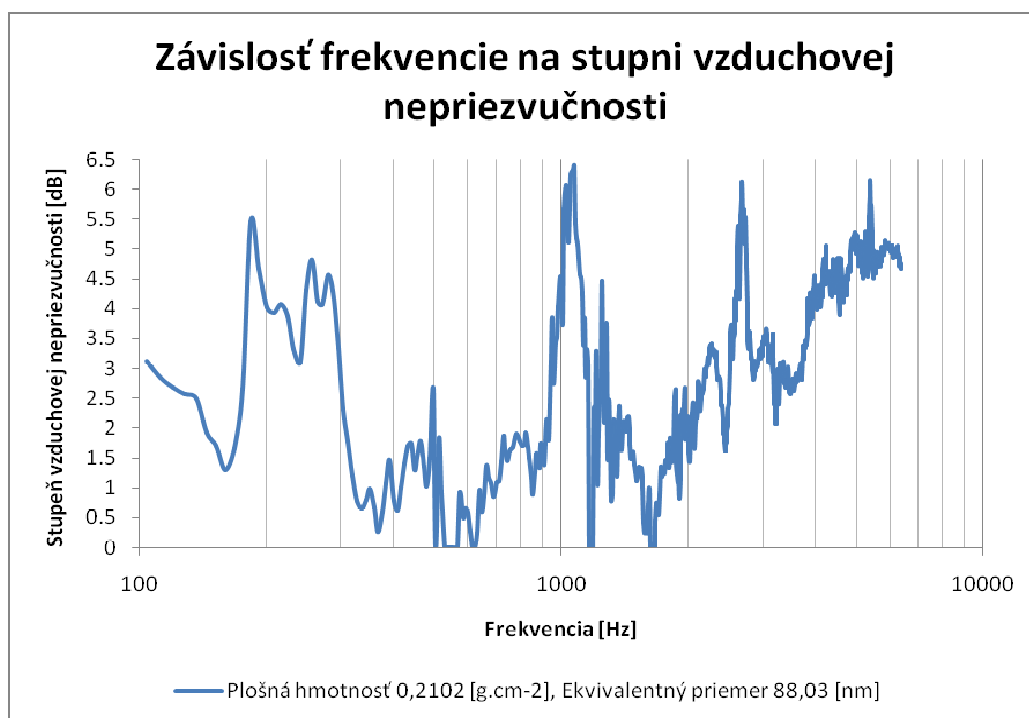
Z uvedených grafov a hodnôt pre 2 vzorky rôznych plošných hmotností je jasné, že so zvyšujúcou sa plošnou hmotnosťou nanovlákennej membrány sa zvyšujú aj hodnoty činiteľa zvukovej pohltivosti a to vedie k lepším zvukovo pohltivým vlastnostiam nanovlákennej membrány.

Taktiež zo spoločného grafu pre všetky vzorky vyrobené pri rovnakej výške zvlákňovania a meniacej sa rýchlosti odťahu – a teda vzoriek so znižujúcou sa plošnou hmotnosťou – je možné zaznamenať znižovanie hodnôt činiteľov zvukovej pohltivosti.

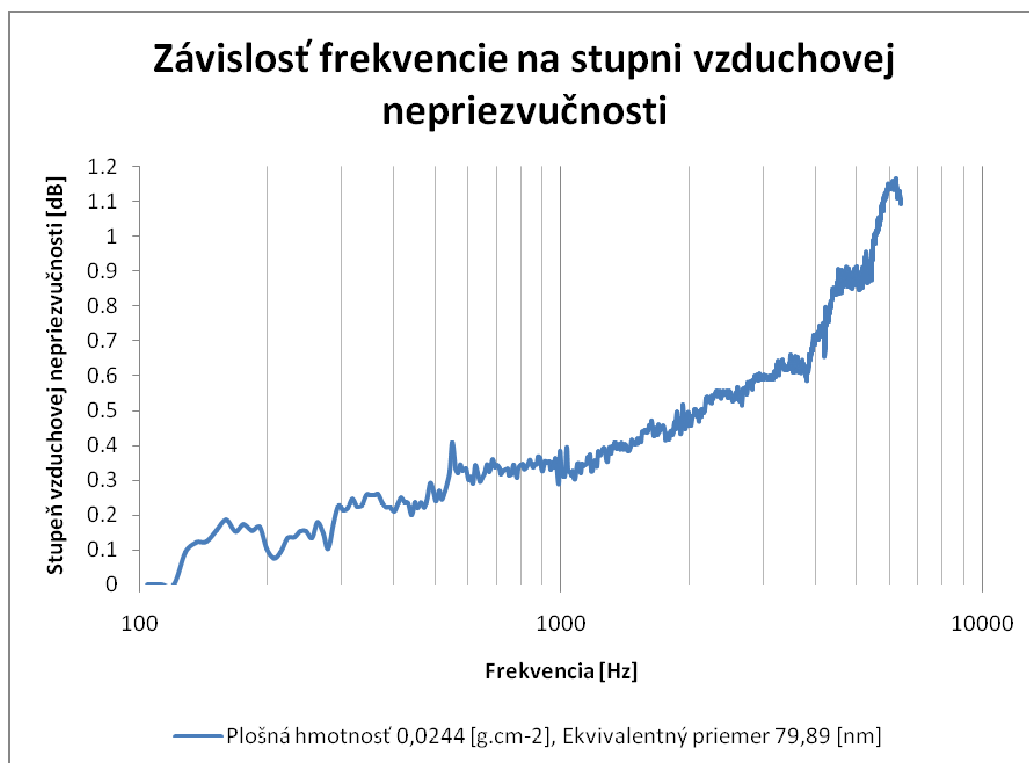


Graf č.4.: Priebehy činiteľov zvukových pohltivosti pre všetky vzorky vyrobené pri všetkých odťahových rýchlostiach a výške zvlákňovania 50 mm

Z grafických vyhodnotení závislosti frekvencií na stupni vzduchovej nepriezvučnosti nebolo možné odčítať hodnoty rezonančných frekvencií a k nim príslušné hodnoty stupňov vzduchovej nepriezvučnosti, nakoľko krivky chaoticky kmitali. Rezonančné frekvencie sa nezhodovali s rezonančnými frekvenciami stanovenými metódou merania pohltivosti. Z grafov však bolo možné zaznamenať, že krivky vykazovali chaotické kmitanie na svojom priebehu pri vyšších hodnotách plošných hmotností vzoriek (viď graf č. 5), avšak so znižovaním plošnej hmotnosti vzoriek krivky vykazovali stúpajúci charakter bez viditeľných rezonancií (viď graf č. 6).



Graf č. 5.: Priebeh stupňa vzduchovej nepriezvučnosti v závislosti na frekvencii pre vzorku s plošnou hmotnosťou 0,2102 g.cm⁻²



Graf č. 5.: Priebeh stupňa vzduchovej nepriezvučnosti v závislosti na frekvencii pre vzorku s plošnou hmotnosťou 0,0244 g.cm⁻²

Grafy závislosti frekvencie na stupni vzduchovej nepriezvučnosti zoradené podľa meniacej sa rýchlosti odťahu materiálu a výšky zvlákňovania pre všetky vzorky sú uvedené v prílohe číslo 4.

4.4 Vplyv ekvivalentného priemeru nanovlákien na akustické charakteristiky

Na akustické charakteristiky (najmä zvukovú pohltivosť) má výrazný vplyv aj zmena ekvivalentného priemeru nanovlákien.



Graf č. 6.: Priebeh činiteľa zvukovej pohltivosti v závislosti na frekvencii, plošná hmotnosť vzorky 0,0473 g.cm⁻², ekvivalentný priemer nanovlákien 85,11 nm

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1290	0,323
1820	0,381
3240	0,509
5990	0,322

Tab. č. 13.: Hodnoty rezonančných frekvencií a činiteľov zvukových pohltivostí pre vzorku s plošnou hmotnosťou 0,0473 g.cm⁻² a ekvivalentným priemerom 85,11 nm



Graf č. 7.: Priebeh činiteľa zvukovej pohltivosti v závislosti na frekvencii, plošná hmotnosť vzorky 0,0667 g.cm⁻², ekvivalentný priemer nanovlákieň 70,55 nm

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
2860	0,999
3430	0,736
4620	0,446
5200	0,350
5100	0,291

Tab. č. 14.: Hodnoty rezonančných frekvencií a činiteľov zvukových pohltivostí pre vzorku s plošnou hmotnosťou 0,0667 g.cm⁻² a ekvivalentným priemerom 70,55 nm

Z tabuľky 13 je vidieť, že pre nanovláknennú vrstvu, ktorú tvoria vlákna o ekvivalentnom priemere 85,11 nm, sa činiteľ zvukovej pohltivosti pohybuje v rozmedzí od 0,3 po 0,5, pričom jeho maximálna hodnota je 0,509 pri frekvencii 3240 Hz.

So znížením hodnoty ekvivalentného priemeru na 70,55 nm sa zvýši hodnota činiteľa zvukovej pohltivosti. Ten sa pohybuje v intervale od 0,9 po 0,2, pričom jeho maximálna hodnota je 0,999 pri frekvencii 2860 Hz (viď tab. č. 14).



Graf č. 8.: Pribeh činiteľa zvukovej pohltivosti v závislosti na frekvencii, plošná hmotnosť vzorky $0,0347 \text{ g.cm}^{-2}$, ekvivalentný priemer nanovlákieň 65,42 nm

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1660	0,798
2360	0,969
3460	0,844
4180	0,654
6180	0,337

Tab. č. 15.: Hodnoty rezonančných frekvencií a činiteľov zvukových pohltivostí pre vzorku s plošnou hmotnosťou $0,0347 \text{ g.cm}^{-2}$ a ekvivalentným priemerom 65,42 nm

Pri hodnote ekvivalentného priemeru 65,42 nm sa rozsah hodnôt činiteľov zvukovej pohltivosti pohybuje v intervale od 0,3 po 0,9. Maximálna hodnota činiteľa zvukovej pohltivosti je 0,969 pri rezonančnej frekvencii 2360 Hz (viď graf č. 8 a tabuľka č. 15)

Porovnaním grafov a hodnôt činiteľov zvukových pohltivosti je teda možné vyvodiť, že so znižujúcim sa ekvivalentným priemerom nanovlákiem dochádza k zvyšovaniu činiteľa zvukovej pohltivosti a tým k efektívnejšiemu pohlcovaniu zvuku.

Všetky grafy priebehov činiteľov zvukovej pohltivosti pre každú vzorku určitej plošnej hmotnosti sú zoradené v prílohe číslo 3. Tabuľky presných hodnôt rezonančných frekvencií a hodnoty činiteľov zvukových pohltivosti pre všetky vzorky sú uvedené v prílohe číslo 5.

Vplyv ekvivalentného priemeru na stupeň vzduchovej nepriezvučnosti nie je v tejto časti hodnotený, nakoľko nebolo možné odčítať jeho presné hodnoty.

5 ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo vyrobiť nanovlákenné vrstvy o rôznych plošných hmotnostiach vzoriek a taktiež rozdielných ekvivalentných priemeroch nanovlákiek. Zmena týchto veličín bola zaistená počas výroby nanovlákennej vrstvy a to postupným zvyšovaním rýchlosti odťahu (2x2, 2, 5, 7 a 10 Hz) vznikajúcej nanovlákennej vrstvy a taktiež zmenou výšky zvlákňovania (50, 70, 90, 110 a 130 mm).

U vzniknutých nanovlákenných vrstiev boli určené presné hodnoty plošných hmotností vzoriek a ekvivalentných priemerov nanovlákiek. Nakoniec boli na vzorkách prevedené akustické skúšky a to meranie zvukovej pohltivosti a vzduchovej nepriezvučnosti materiálu.

Výsledky boli spracované číselne do tabuliek a následne graficky a vyhodnocoval sa na nich vplyv plošnej hmotnosti a ekvivalentného priemeru na zmienené akustické charakteristiky.

Na zmenu plošnej hmotnosti vzoriek mali vplyv rôzne odťahové rýchlosti materiálu a rôzne výšky zvlákňovania. Zvyšovaním rýchlosti odťahu pri rovnakej výške zvlákňovania dochádzalo k znižovaniu plošnej hmotnosti vzoriek. Naopak zmenou výšky zvlákňovania pri rovnakej odťahovej rýchlosti materiálu dochádzalo k zvyšovaniu plošnej hmotnosti (V tomto prípade došlo k niekoľkým výchyľkam, ktoré mohli byť dané nedokonalosťou metódy stanovenia plošnej hmotnosti).

Odťahová rýchlosť aj výška zvlákňovania viedli k znižovaniu hodnôt ekvivalentného priemeru nanovlákiek.

Akustické charakteristiky – zvukovú pohltivosť a vzduchovú nepriezvučnosť význame ovplyvňovali meniace sa hodnoty plošných hmotností vzoriek a ekvivalentných priemerov nanovlákiek. So zvyšujúcou sa hodnotou plošnej hmotnosti nanovlákennej membrány sa zvyšovali aj hodnoty činiteľa zvukovej pohltivosti a to vedie k lepším zvukovo pohltivým vlastnostiam nanovlákennej membrány.

Znižovanie ekvivalentného priemeru nanovlákiek viedlo k zvyšovaniu činiteľa zvukovej pohltivosti a tým k efektívnejšiemu pohlcovaniu zvuku. Pri nižšom ekvivalentnom priemere vlákien vzniklo vo vlákenej vrstve viac pórov, čo zaisťuje lepšiu pohltivosť zvuku.

Rezonančné frekvencie stupňa vzduchovej nepriezvučnosti sa nezhodovali s rezonančnými frekvenciami pohltivosti, preto by bolo dobré v budúcnosti upriamiť pozornosť aj na túto veličinu a bližšie skúmať, ako sa mení s meniacimi sa parametrami nanovlákennej membrány.

6 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Jirsák, O. - Kalinová, K.: Netkané textilie, Liberec 2003
- [2] Ramakrishna, S. - Fujihara, K. - Teo, W. - Lim, T. - Ma, Z.: An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, National University of Singapore, World Scientific 2005
- [3] Elmarco, dostupné na World Wide Web: <http://www.elmarco.com>
- [4] Nanovlákná, dostupné na World Wide Web:
<http://www.che.vt.edu/Wilkes/electrospinning/electrospinning.html>
- [5] Růžicková, J.:Elektrostatické zvlákňování nanovláken, TUL 2004
- [6] Formhals, A.: US, patent 1,975,504, 1934
- [7] Formhals, A.: US, patent 2,160,962, 1939
- [8] Formhals, A.: US, patent 2,187,306, 1940
- [9] Formhals, A.: US, patent 2,323,025, 1943
- [10] Formhals, A.: US, patent 2,349,950, 1944
- [11] Vonnegut, B. - Neubauer, R. L.: Journal of Colloid Science 7, 1952
- [12] Elmarco, Technologie electrospinningu, dostupné na World Wide Web:
<http://www.elmarco.com/obsah.php?id=27&s=25>
- [13] Technológia nanospider, dostupné na World Wide Web:
<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=WO2005024101&F=0>
- [14] Jirsák, O. – Sanetrník, F. – Lukáš, D. – Kotek, V. – Martinová, L. – Chaloupek, J.: A method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method, European Patent Office, US 2006290031
- [15] Krebsová, M.: Nauka o polymerech, Liberec 1979
- [16] Svoboda, E. a kol.: Přehled středoškolské fyziky, Prometheus, Praha 1996
- [17] Počutelnost' zvuku, dostupné na World Wide Web:
http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [18] <http://www.amf-cz.cz/akustika/cze/akustika03.htm>
- [19] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zvuk>
- [20] Aisberg, E.: Fyzika všude kolem nás, SPN, Praha 1975
- [21] Rozdelenie akustiky, dostupné na World Wide Web: www.glsfyzika.szm.sk
- [22] Rýchlosť zvuku, dostupné na World Wide Web:
<http://sk.wikipedia.org/wiki/Zvuk>

- [23] Horák, Z. – Krupka, F. – Šendelář, V.: Technická fyzika, SNTL, Praha 1960
- [24] Intenzita zvuku, dostupné na World Wide Web: www.glsfyzika.szm.sk
- [25] Krempaský, J.: Príručka pre vysoké školy technické, ALFA, Bratislava 1987
- [26] Kolmer, F. – Kyncl, J.: Prostorová akustika SNTL, Praha 1982
- [27] Škvor, Z.: Akustika a elektroakustika. 1. Vydání. SNTL, Praha 1980
- [28] Hejgrlíková, Z.: Stanovení rezonance nanovláknenné vrstvy v závislosti na jejich parametrech. Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci, 2007
- [29] Helmholtzove rezonátory, dostupné na World Wide Web: <http://www.hunecke.de/en/knowledge/absorbers/helmholtz-resonators.html>
- [30] Kalinová, K.: Zvuková pohltivost vlákenných materiálů s ohledem na charakteristiku struktúry. Disertační a habilitační práce, Technická univerzita v Liberci, 2005
- [31] Odraz a pohlcovanie zvukovej energie, dostupné na World Wide Web: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [32] Martinová, L.: Solution properties for electrospinning, 10th International conference, TUL Liberec, December 2003
- [33] Metóda merania činiteľa zvukovej nepriezvučnosti, dostupné na World Wide Web: <http://www.isvr.co.uk/labtests/absorb.htm>
- [34] Meranie v dozvukovej miestnosti, dostupné na World Wide Web: <http://www.isvr.co.uk/labtests/absorb.htm>
- [35] Brüel & Kjaer, Denmark: Sound & Vibration Measurement. Naerum 2000 - 2002
- [36] Dvojmikrofonová impedančná trubica, dostupné na World Wide Web: <http://www.bksv.com/doc/Bp1039.pdf>
- [37] Školiace a pilotné pracovisko TU v Liberci – Spectris, dostupné na World Wide Web: <http://www.ksd.vslib.cz/>
- [38] Anizotropia, dostupné na World Wide Web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Anisotropy>
- [39] Lukáš, D.: Stereologie textilních materiálů. Skriptum, TU Liberec, 2000
- [40] Rataj, J. - Saxl, I.: Analysis of Planar Anisotropy by Means of Steiner Compact: A Simple Graphical Method, Acta Stereologica, 1988
- [41] Rastrovací elektróbový mikroskop VEGA – TESCAN, dostupné na World Wide Web: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/vyzkumna_cinnost

7 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č. 1.: Prehľad snímok vlákien a k nim odpovedajúce smerové ružice

Príloha č. 2.: Postup naprogramovania tvorby smerovej ružice podľa Fourierovej transformácie v programe MATLAB

Príloha č. 3.: Grafy závislosti frekvencie na činiteľovi zvukovej pohltivosti zoradené podľa meniacej sa rýchlosti odťahu materiálu a výšky zvlákňovania

Príloha č. 4.: Grafy závislosti frekvencie na stupni vzduchovej nepriezvučnosti zoradené podľa meniacej sa rýchlosti odťahu materiálu a výšky zvlákňovania

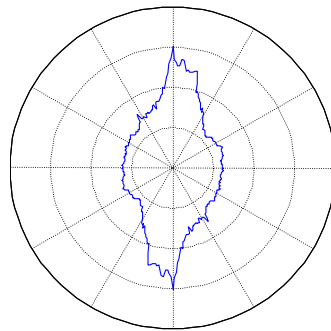
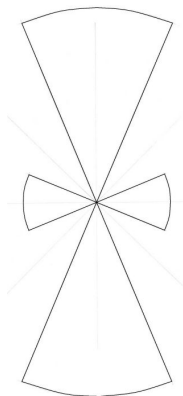
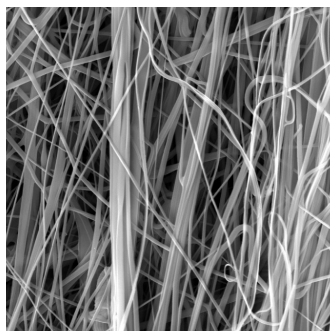
Príloha č. 5.: Tabuľky odčítaných hodnôt rezonančných frekvencií a k nim odpovedajúce hodnoty činiteľov zvukovej pohltivosti

Príloha č. 1

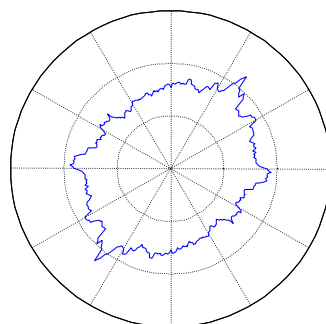
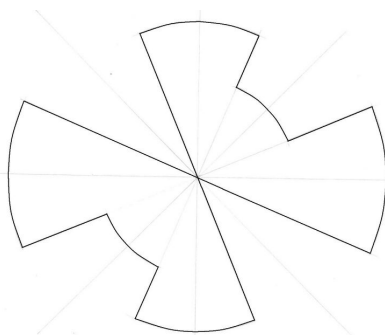
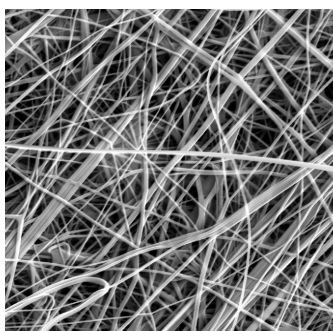
Odtáhová rýchlosť 2x2 Hz, výška zvlákňovania 50 mm,

Smerová ružica - Steiner

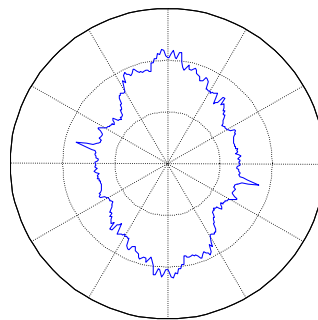
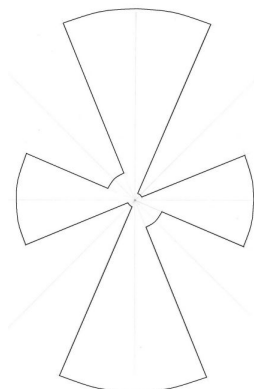
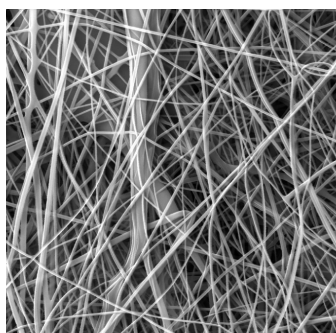
Fourierova transformácia



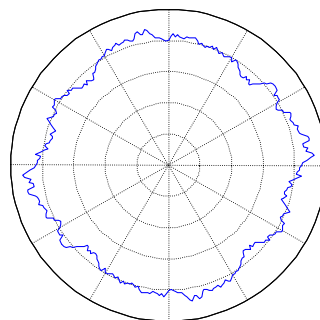
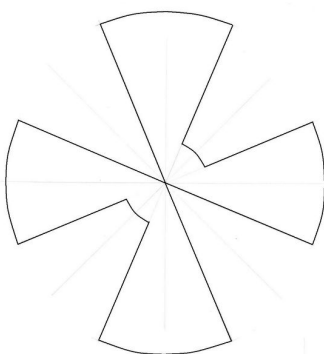
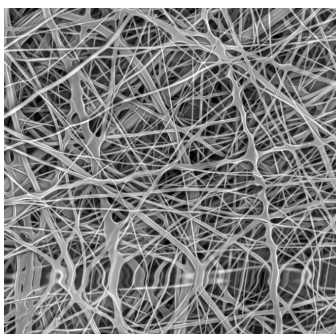
Odtáhová rýchlosť 2x2 Hz, výška zvlákňovania 70 mm



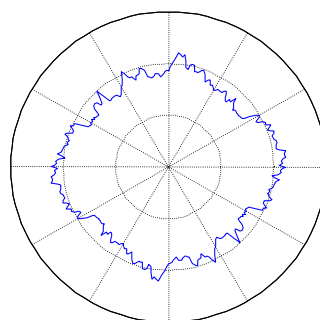
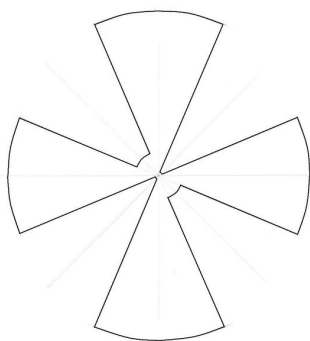
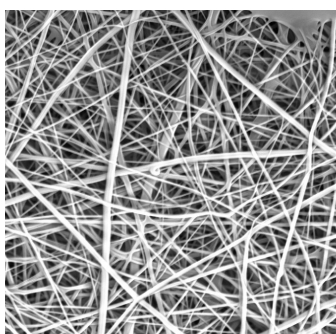
Odtáhová rýchlosť 2x2 Hz, výška zvlákňovania 90 mm



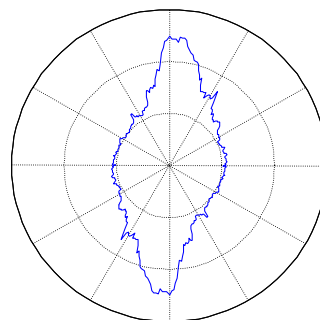
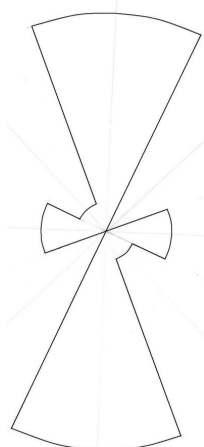
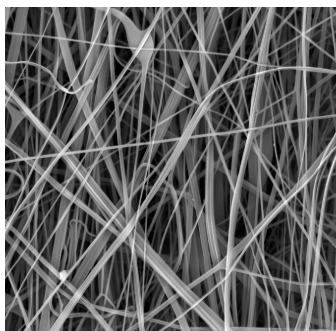
Odťahová rýchlosť 2x2 Hz, výška zvlákňovania 110 mm



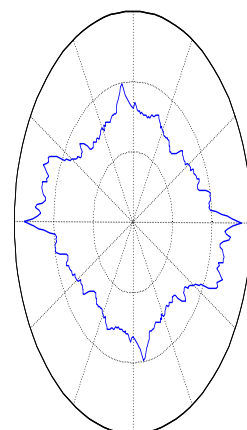
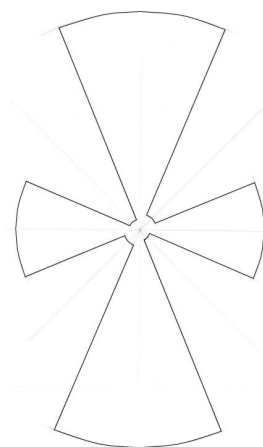
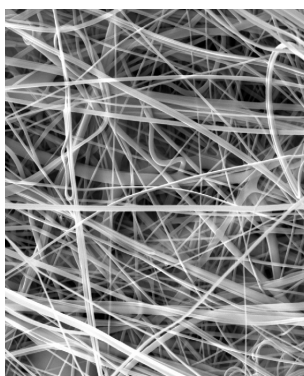
Odťahová rýchlosť 2x2 Hz, výška zvlákňovania 130 mm



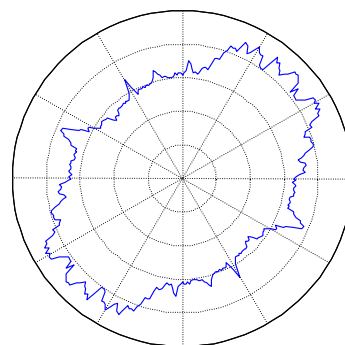
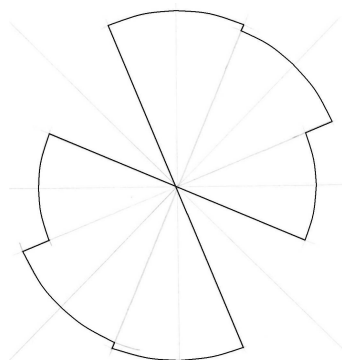
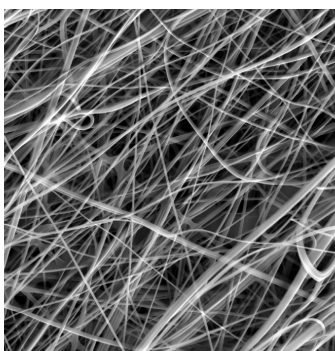
Odťahová rýchlosť 2 Hz, výška zvlákňovania 50 mm



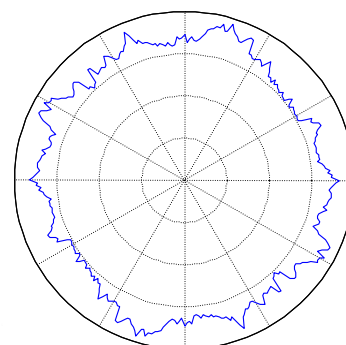
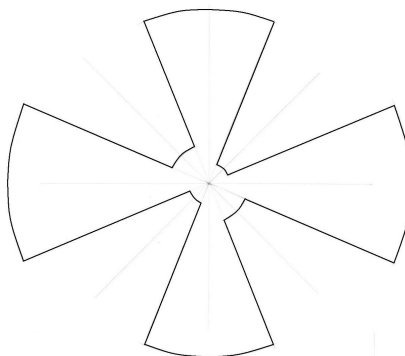
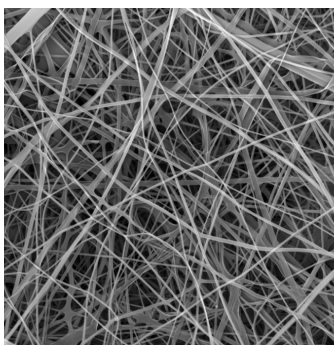
Odtáhová rýchlosť 2 Hz, výška zvlákňovania 70 mm



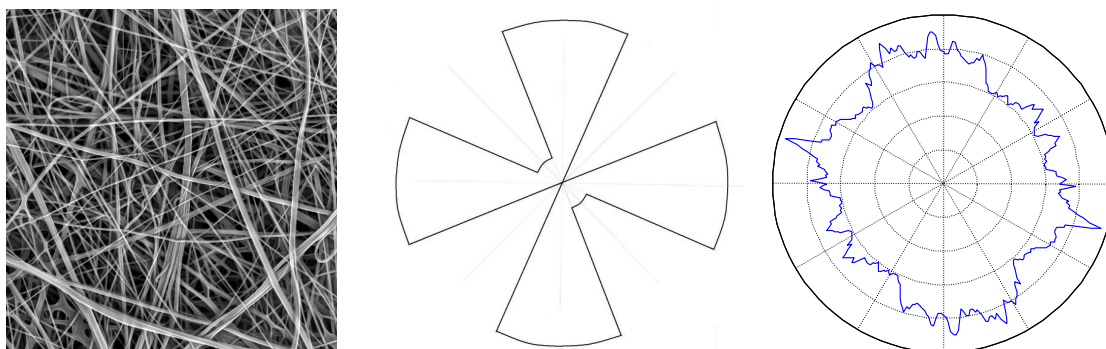
Odtáhová rýchlosť 2 Hz, výška zvlákňovania 90 mm



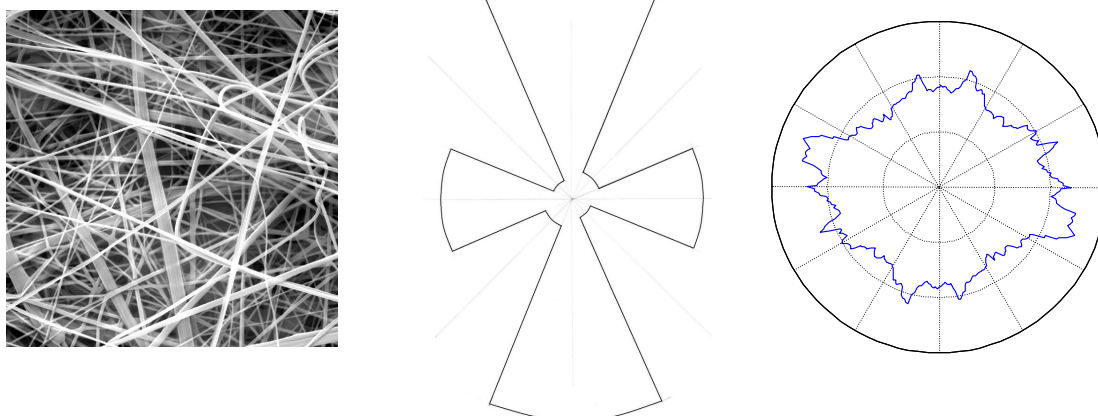
Odtáhová rýchlosť 2 Hz, výška zvlákňovania 110 mm



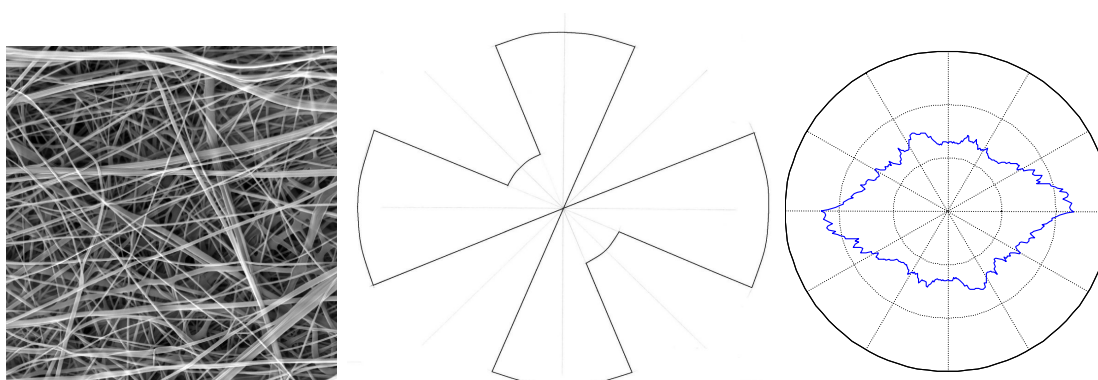
Odtáhová rýchlosť 2 Hz, výška zvlákňovania 130 mm



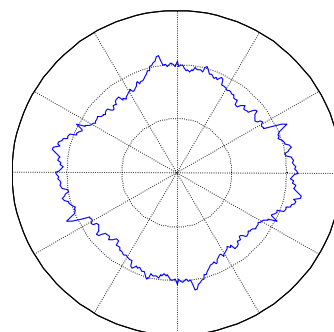
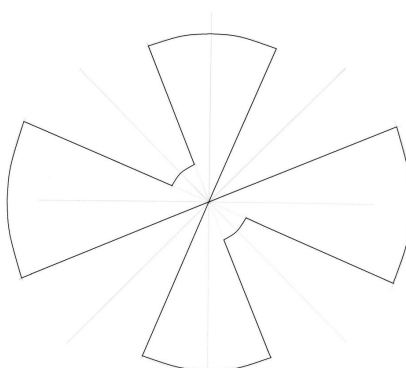
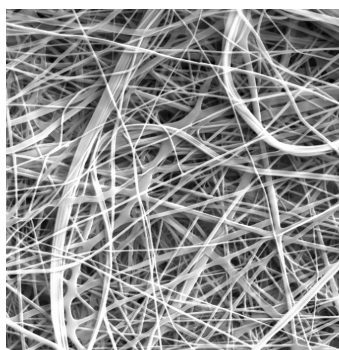
Odtáhová rýchlosť 5 Hz, výška zvlákňovania 50 mm



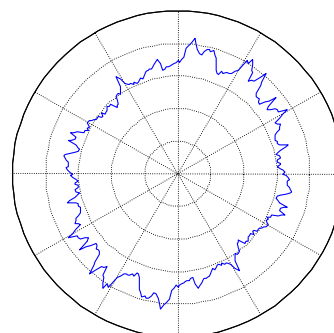
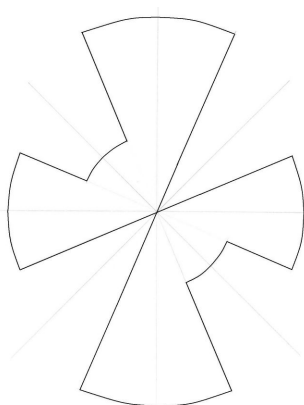
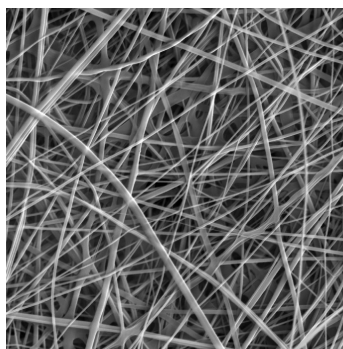
Odtáhová rýchlosť 5 Hz, výška zvlákňovania 70 mm



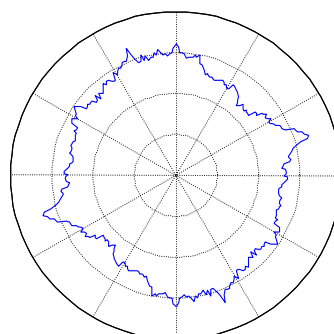
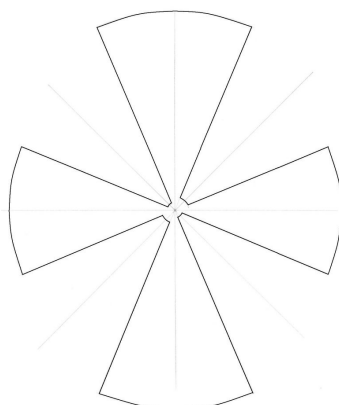
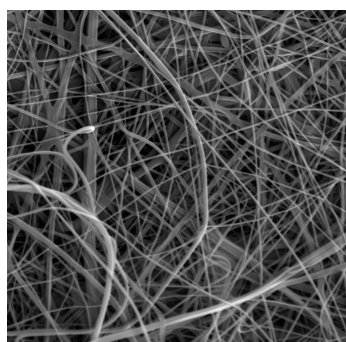
Odtáhová rýchlosť 5 Hz, výška zvlákňovania 90 mm



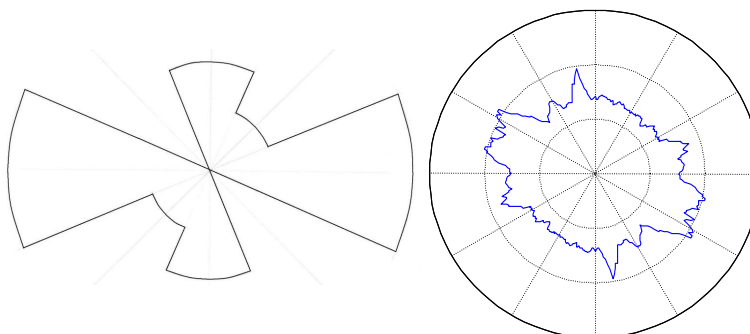
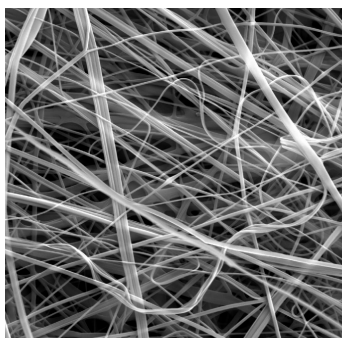
Odtáhová rýchlosť 5 Hz, výška zvlákňovania 110 mm



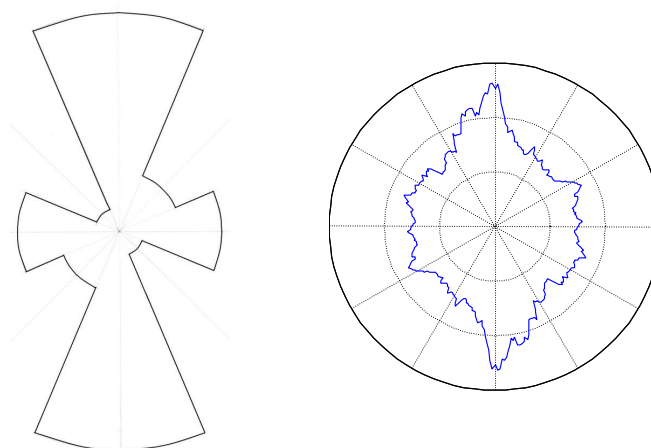
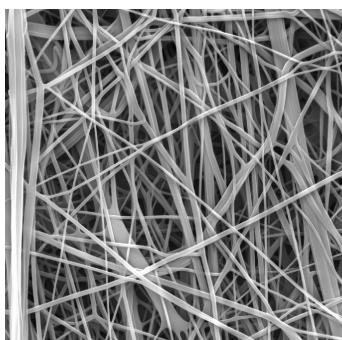
Odtáhová rýchlosť 5 Hz, výška zvlákňovania 130 mm



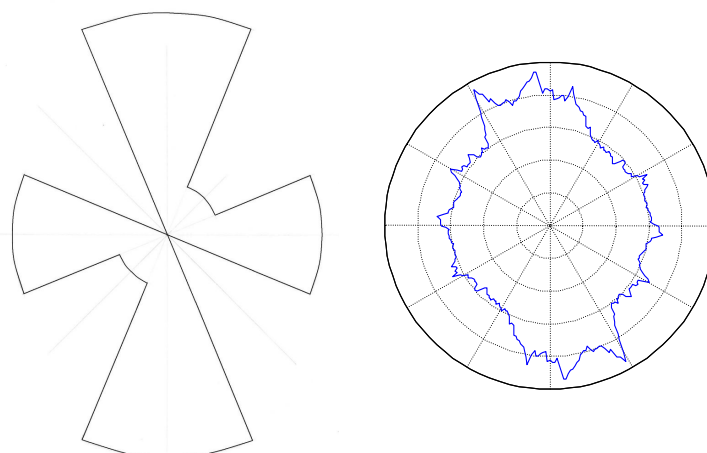
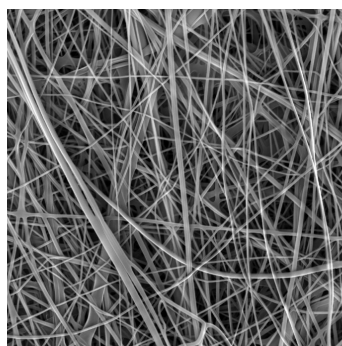
Odťahová rýchlosť 7 Hz, výška zvlákňovania 50 mm



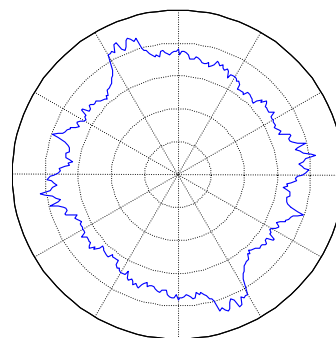
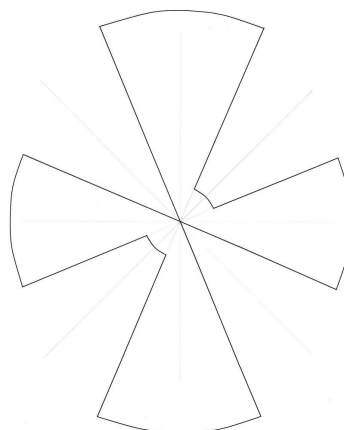
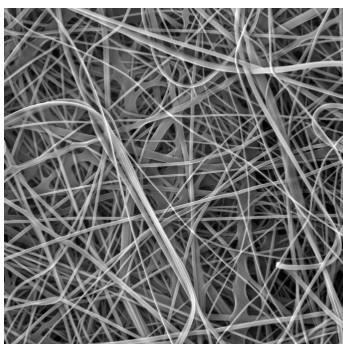
Odťahová rýchlosť 7 Hz, výška zvlákňovania 70 mm



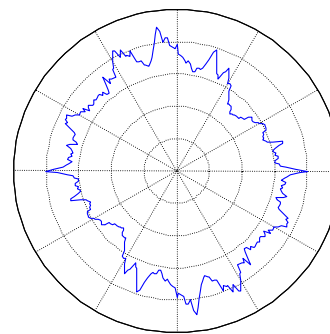
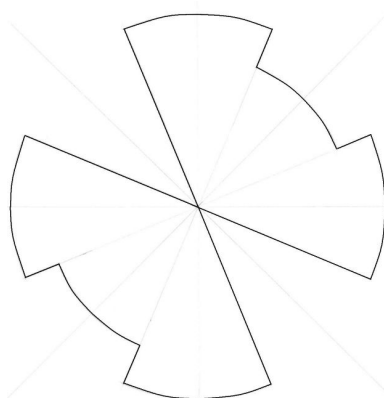
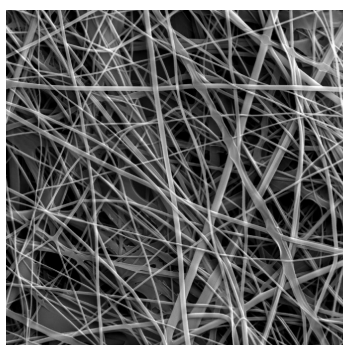
Odťahová rýchlosť 7 Hz, výška zvlákňovania 90 mm



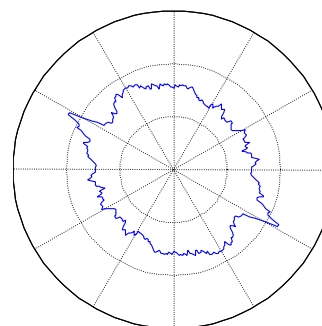
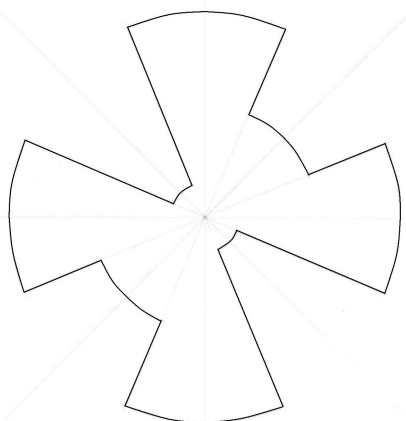
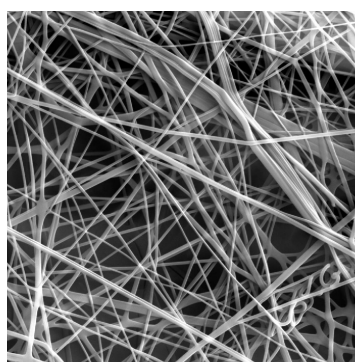
Odťahová rýchlosť 7 Hz, výška zvlákňovania 110 mm



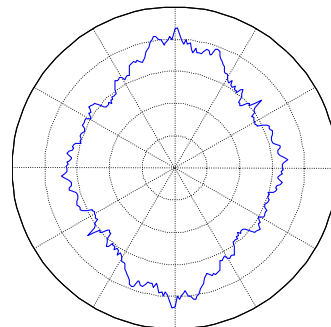
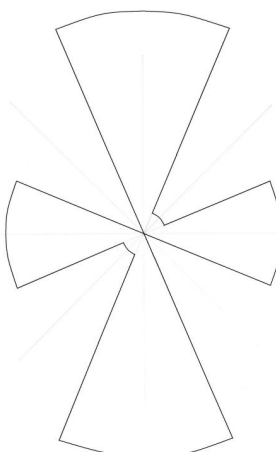
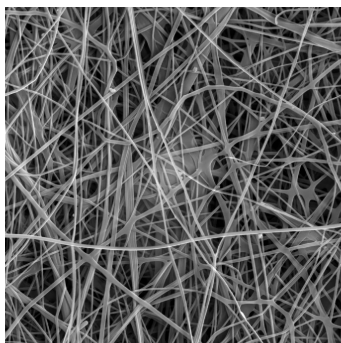
Odťahová rýchlosť 7 Hz, výška zvlákňovania 130 mm



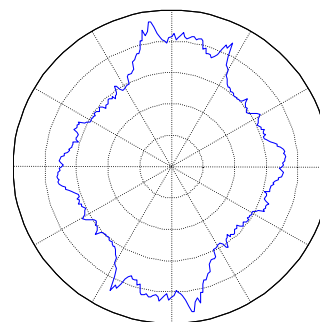
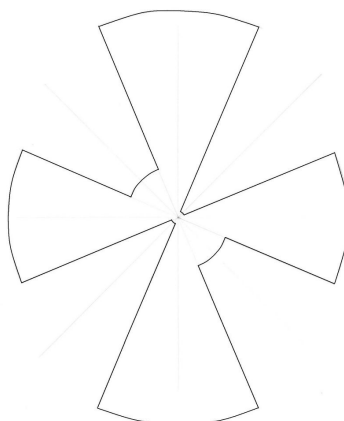
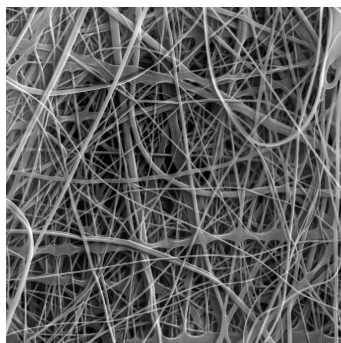
Odťahová rýchlosť 10 Hz, výška zvlákňovania 50 mm



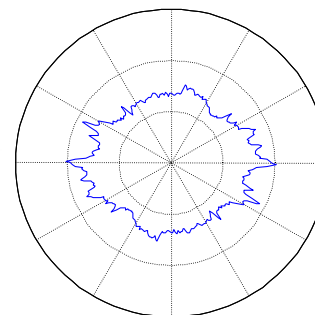
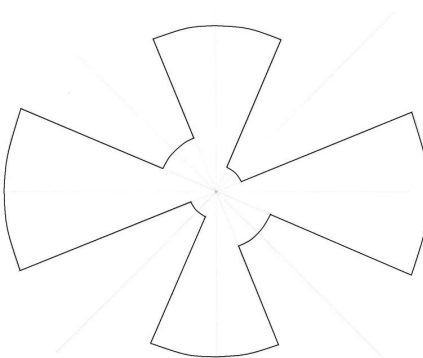
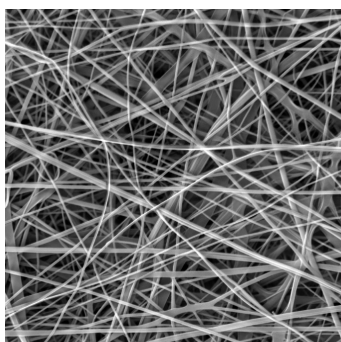
Odťahová rýchlosť 10 Hz, výška zvlákňovania 70 mm



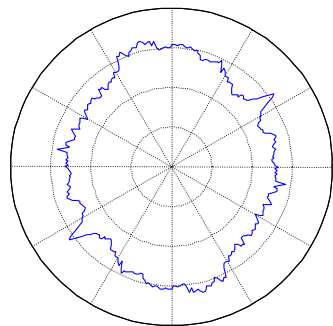
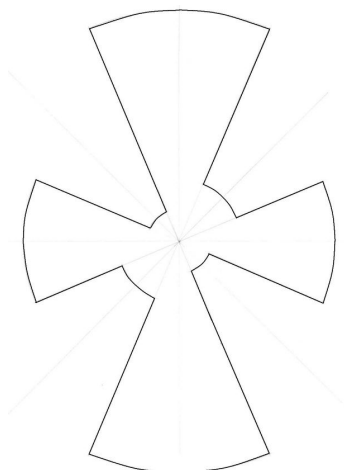
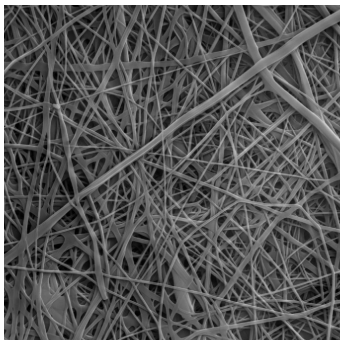
Odťahová rýchlosť 10 Hz, výška zvlákňovania 90 mm



Odťahová rýchlosť 10 Hz, výška zvlákňovania 110 mm



Odtáhová rýchlosť 10 Hz, výška zvlákňovania 130 mm



Príloha č. 2

```
%function anizotropia(I,krokgr)

%%%% Nacitanie obrazu %%%%
%I=ones(200);
I=imread('5.jpg');
%I=imrotate(I,90);
%I=I(1:10,1:10);
%[c I]=model2D(500,1,1,1,1,0,0,1,1,0,[1 0 0;0 1 0; 0 0 1]);
%figure,imshow(I,[])

krokgr=1;
%I=imread('P2.jpg');
[rr ss uu]=size(I);
if uu>1
    I=rgb2gray(I);
    disp('prevod RGB na GRAY')
end

[rr ss uu]=size(I);
if rr<ss
    I=imcrop(I,[1 1 rr-1 rr-1]);
    disp('orez matice na ctvercovu')
else
    I=imcrop(I,[1 1 ss-1 ss-1]);
end

[rr ss uu]=size(I);
modulus=mod(rr,2);
if modulus==0
    I=imcrop(I,[1 1 rr-2 rr-2]);
    disp('orez matice o 1 pixel, rozmer je lichy pocet pixelov')
end
I=double(I);
mmax=max(I(:));
if mmax>1
    I=I/255;
end
%figure,subplot(1,2,1),
figure,imshow(I,[0 1])
%figure,imhist(I)
[r s]=size(I);

% level = graythresh(I)
% I=im2bw(I,level);
% figure,imshow(I,[])

%%%% 2DFT %%%%

F=fft2(I); % 2D Fourierova transformacia
S=log(1+abs(F)); % vykonove spektrum necentrovane|F|
Fc=fftshift(F); % centrovanie
Fca=abs(Fc); % Fourierove spektrum
DC=[floor(r/2)+1, floor(s/2)+1]; % Direct Current
S1=log(1+abs(Fc)); % spektrum |Fc|
%figure,imshow(S1,[])
%%%% Zadanie kroku %%%%
```

```

%krok=pi/8;
%krokgr=krok*360/(2*pi)
krok=krokgr*2*pi/360;

M=zeros(size(I));
SP=zeros(size(I));
uh=[];
sumaN13=[];
sumaN24=[];
sumaT13=[];
sumaT24=[];
for kk=0:krok:pi/2
    N13=zeros(size(I));
    N24=zeros(size(I));
    T13=zeros(size(I));
    T24=zeros(size(I));
    uh=[uh, kk];
    uhol=kk;
    if uhol<=pi/4 & uhol>=0
        ry=[];
        sx=[];
        for i=1:DC(2)-1;
            sx=[sx, i];
            ry=[ry, (tan(uhol)*i)];
        end
        ry=DC(1)-ry;
        sx=sx+DC(2);
        suradnice1=round([ry' sx']);
        suradnice2=[suradnice1(:,1), s+1-suradnice1(:,2)];
        suradnice3=[r+1-suradnice1(:,1), s+1-suradnice1(:,2)];
        suradnice4=[r+1-suradnice1(:,1), suradnice1(:,2)];
        n=length(suradnice1);
        for ii=1:n

            end
            M(DC(1),DC(2))=I(DC(1),DC(2));
            N13(DC(1),DC(2))=I(DC(1),DC(2));
            N24(DC(1),DC(2))=I(DC(1),DC(2));
            SP13(DC(1),DC(2))=S1(DC(1),DC(2));
            SP24(DC(1),DC(2))=S1(DC(1),DC(2));
            T13(DC(1),DC(2))=Fca(DC(1),DC(2));
            T24(DC(1),DC(2))=Fca(DC(1),DC(2));
        else ry=[];
            sx=[];
            for i=1:DC(1)-1;
                ry=[ry, i];
                sx=[sx, (i/tan(uhol))];
            end
            sx=DC(2)-sx;
            suradnice=round([ry' sx']);
            suradnice1=suradnice;
            suradnice1(:,2)=s+1-flipud(suradnice(:,2));
            suradnice2=[suradnice1(:,1), s+1-suradnice1(:,2)];
            suradnice3=floor([DC(1)+suradnice(:,1), suradnice(:,2)]);
            suradnice4=[r+1-suradnice1(:,1), suradnice1(:,2)];
            n=length(suradnice1);
            for ii=1:n

            end
            M(DC(1),DC(2))=I(DC(1),DC(2));
            N13(DC(1),DC(2))=I(DC(1),DC(2));

```

```

N24(DC(1),DC(2))=I(DC(1),DC(2));
SP13(DC(1),DC(2))=S1(DC(1),DC(2));
SP24(DC(1),DC(2))=S1(DC(1),DC(2));
T13(DC(1),DC(2))=Fca(DC(1),DC(2));
T24(DC(1),DC(2))=Fca(DC(1),DC(2));

end
sumaN13=[sumaN13; kk sum(sum(N13))];
sumaN24=[sumaN24; kk sum(sum(N24))];
sumaT13=[sumaT13; kk sum(sum(T13))];
sumaT24=[sumaT24; kk sum(sum(T24))];
% figure,imshow(N13,[])
% figure,imshow(N24,[])
end
SP13(DC(1),:)=0;SP13(:,DC(2))=0;
SPZ=SP13+SP24;
SPZ(DC(1),DC(2))=S1(DC(1),DC(2));
%figure,imshow(SPZ,[])

%%%%% Polarny diagram %%%%

sumaT=[sumaT13;flipud(sumaT24(2:end-1,:))];
a90=0+krok:krok:pi/2;
a360=pi/2:krok:2*pi;
alfa=[a360';a90'];
sumaTT=[sumaT(1:end,2);sumaT(1:end,2);sumaT(1,2)];
%subplot(1,2,2),
figure,polar(alfa',sumaTT','.b-')

%%%%% Histogram %%%%

minuh=0;
maxuh=180;
alfa1=90:-krokgr:0;
alfa2=180:-krokgr:90+krok;
alfa3=[alfa1, alfa2];
sumaTTT=flipud([sumaT(:,2);sumaT(end,2)]);

% figure,bar(alfa3,sumaTTT,.9)
% set(gca,'XDir','reverse')
% set(gca,'XLim',[minuh maxuh])

%%%%%%%%%%

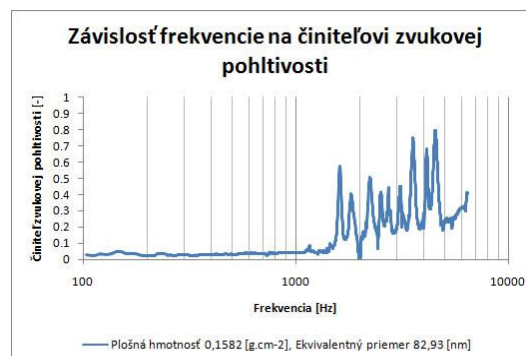
```

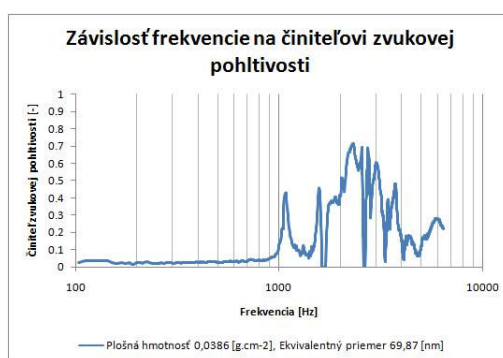
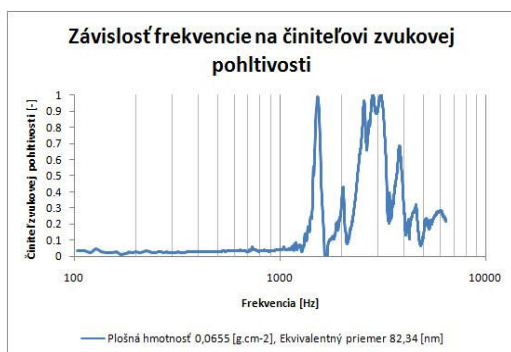
Príloha č. 3

Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 50 mm

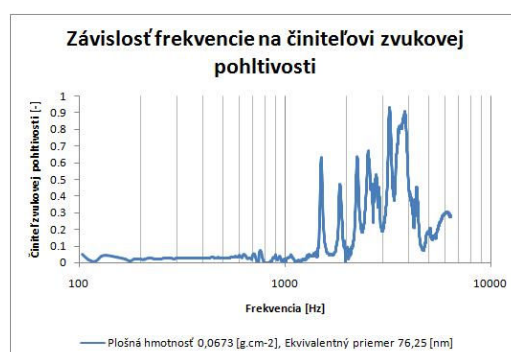


Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 70 mm



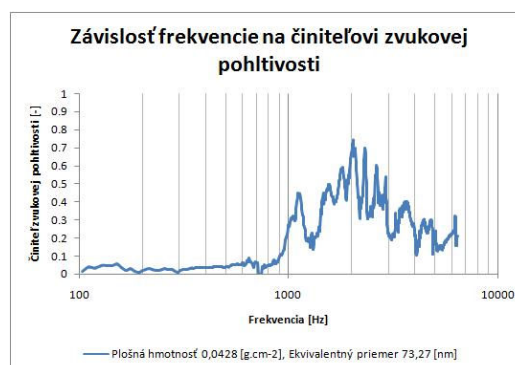


Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 90 mm

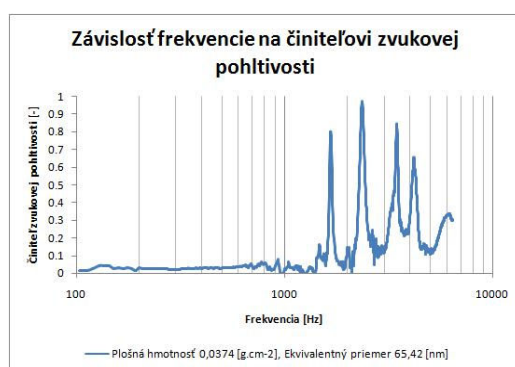
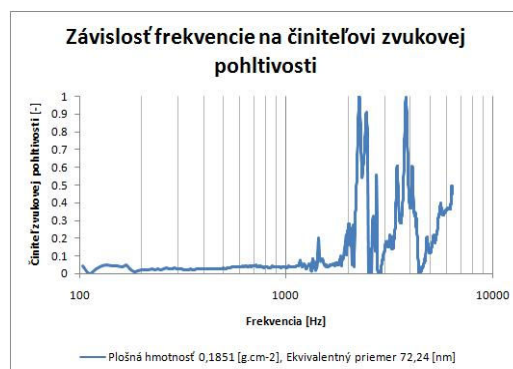




Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 110 mm

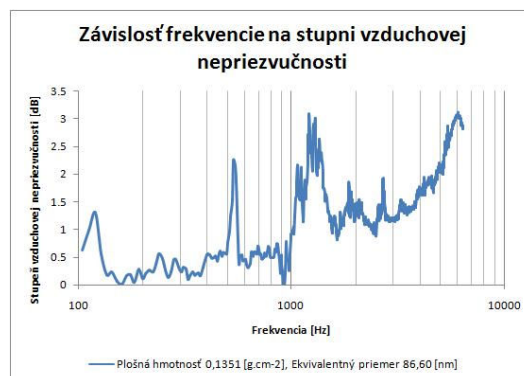


Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 130 mm



Príloha č. 4

Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 50 mm



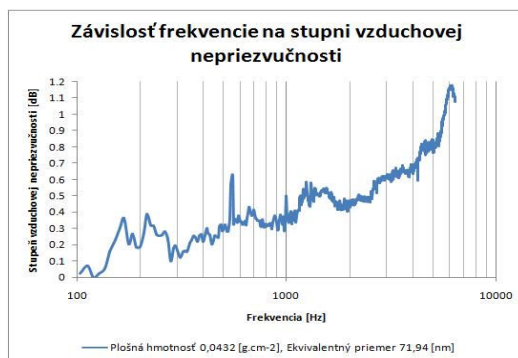
Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 70 mm





Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 90 mm





Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 110 mm



Vzdialenosť zvlákňovacej elektródy 130 mm



Príloha č. 5

Rýchlosť odvádzania 2x2 Hz, vzdialenosť elektródy 50 mm
Plošná hmotnosť 0,2102 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 88,03 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1140	0,478
1880	0,642
2490	0,722
3440	0,418
4140	0,402
6400	0,661

Rýchlosť odvádzania 2 Hz, vzdialenosť elektródy 50 mm
Plošná hmotnosť 0,1351 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 86,60 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1180	0,928
1860	0,682
2700	0,762
3830	0,492
6130	0,326

Rýchlosť odvádzania 5 Hz, vzdialenosť elektródy 50 mm
Plošná hmotnosť 0,0473 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 85,11 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1290	0,323
1820	0,381
3240	0,509
5990	0,322

Rýchlosť odvádzania 7 Hz, vzdialenosť elektródy 50 mm
Plošná hmotnosť 0,0244 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 79,89 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1650	0,293
2420	0,729
3080	0,256
6020	0,312

Rýchlosť odvádzania 10 Hz, vzdialenosť elektródy 50 mm
Plošná hmotnosť 0,0231[g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 72,50 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
728	0,163
1700	0,576
3680	0,299
6000	0,312

Rýchlosť odvádzania 2x2 Hz, vzdialenosť elektródy 70 mm
Plošná hmotnosť 0,2153 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 88,71 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1760	0,853
2020	0,894
2710	0,946
4040	0,984

Rýchlosť odvádzania 2 Hz, vzdialenosť elektródy 70 mm
Plošná hmotnosť 0,1582 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 82,93 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1820	0,405
2230	0,507
3560	0,749
4520	0,792

Rýchlosť odvádzania 5 Hz, vzdialenosť elektródy 70 mm
Plošná hmotnosť 0,0655 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 82,34 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
2020	0,429
2570	0,960
3820	0,685
4580	0,318

Rýchlosť odvádzania 7 Hz, vzdialenosť elektródy 70 mm
Plošná hmotnosť 0,0433 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 77,63 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1580	0,374
2020	0,520
2980	0,889
3890	0,702

Rýchlosť odvádzania 10 Hz, vzdialenosť elektródy 70 mm
Plošná hmotnosť 0,0386 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 69,87 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1580	0,456
3000	0,607
3730	0,481
5860	0,280

Rýchlosť odvádzania 2x2 Hz, vzdialenosť elektródy 90 mm
Plošná hmotnosť 0,3437 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 86,64 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1880	0,236
2290	0,733
3540	0,958
3880	0,999
6220	0,897

Rýchlosť odvádzania 2 Hz, vzdialenosť elektródy 90 mm
Plošná hmotnosť 0,1925 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 85,25 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1910	0,931
3350	0,997
4570	0,353
6390	0,556

Rýchlosť odvádzania 5 Hz, vzdialenosť elektródy 90 mm
Plošná hmotnosť 0,0714 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 77,21 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1900	0,326
2820	0,668
3610	0,517
6110	0,299

Rýchlosť odvádzania 7 Hz, vzdialenosť elektródy 90 mm
Plošná hmotnosť 0,0673 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 76,25 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1850	0,469
2250	0,634
3220	0,928
4350	0,453

Rýchlosť odvádzania 10 Hz, vzdialenosť elektródy 90 mm
Plošná hmotnosť 0,0432 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 71,94 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1020	0,442
3020	0,745
3550	0,846
6110	0,301

Rýchlosť odvádzania 2x2 Hz, vzdialenosť elektródy 110 mm
Plošná hmotnosť 0,3383 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 78,98 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1360	0,337
1890	0,940
4000	0,704
6340	0,968

Rýchlosť odvádzania 2 Hz, vzdialenosť elektródy 110 mm
Plošná hmotnosť 0,1884 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 73,12 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
2320	0,533
2600	0,856
3420	0,502
4290	0,465

Rýchlosť odvádzania 5 Hz, vzdialenosť elektródy 110 mm
Plošná hmotnosť 0,0653 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 77,09 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
2300	0,684
3250	0,826
3610	0,988
4380	0,464

Rýchlosť odvádzania 7 Hz, vzdialenosť elektródy 110 mm
Plošná hmotnosť 0,0428 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 73,27 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1110	0,449
1810	0,591
2320	0,697
3600	0,403

Rýchlosť odvádzania 10 Hz, vzdialenosť elektródy 110 mm
Plošná hmotnosť 0,0227 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 71,66 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1000	0,349
2940	0,536
4460	0,461
6260	0,310

Rýchlosť odvádzania 2x2 Hz, vzdialenosť elektródy 130 mm
Plošná hmotnosť 0,3306 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 79,87 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
2020	0,755
2720	0,950
4280	0,794
6400	0,882

Rýchlosť odvádzania 2 Hz, vzdialenosť elektródy 130 mm
Plošná hmotnosť 0,1851 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 72,24 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
2740	0,554
3450	0,605
3800	0,995
6340	0,494

Rýchlosť odvádzania 5 Hz, vzdialenosť elektródy 130 mm
Plošná hmotnosť 0,0667 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 70,55 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
2860	0,999
3430	0,736
4620	0,446
5200	0,350
5100	0,291

Rýchlosť odvádzania 7 Hz, vzdialenosť elektródy 130 mm
Plošná hmotnosť 0,0602 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 68,59 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1190	0,493
1510	0,396
2900	0,538
6080	0,3304

Rýchlosť odvádzania 10 Hz, vzdialenosť elektródy 130 mm
Plošná hmotnosť 0,0374 [g.cm⁻²], ekvivalentný priemer 65,42 [nm]

Rezonančná frekvencia f [Hz]	Činiteľ zvukovej pohltivosti α [-]
1660	0,798
2360	0,969
3460	0,844
4180	0,654
6180	0,337